H. VEAUX

Recueil de PROBLÈMES DE T.S.F.

AVEC SOLUTIONS

Eyrolles
ÉDITEUR, PARIS

RECUEIL
DE
PROBLÈMES DE T.S.F.
AVEC SOLUTIONS

A L'USAGE DES CANDIDATS AU CERTIFICAT D'OPÉRATEUR RADIOTÉLÉGRAPHISTE DE Ire CLASSE A BORD DES STATIONS MOBILES ET DES CADRES MOYENS DES SERVICES RADIOÉLECTRIQUES

PAR M. VEAUX
Ingénieur en chef à la Direction Générale des Télécommunications

Quatrième édition revue et augmentée

ÉDITIONS EYROLLES
61, Boulevard Saint-Germain, PARIS (5e)
1958
Tous droits réservés

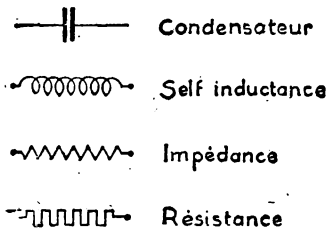
PREFACE

Ce recueil de problèmes élémentaires de T. S. F. répond à un but principal : il est destiné en premier lieu à la préparation à l'examen d'Officier Radiotélégraphiste de la Marine Marchande (certificat de première classe délivré par l'Administration des P. T. T.). Nous nous sommes proposé de présenter un ouvrage d'enseignement; la division en est faite en douze chapitres répondant chacun à un ensemble déterminé de connaissances; chaque chapitre est précédé d'un résumé précis des connaissances mises en jeu dans les problèmes et comporte, notamment, toutes formules utiles avec mention des unités convenables; les premiers problèmes qui suivent le résumé représentent une application directe des formules : très simples, ils sont particulièrement destinés à dissiper dans l'esprit du lecteur toute équivoque sur le sens et le champ d'application des formules et à familiariser avec les ordres de grandeur des phénomènes; mais la plus grande partie des problèmes est faite des épreuves posées aux diverses sessions d'examen des Officiers Radiotélégraphistes de la Marine Marchande; pour faire apparaître avec exactitude le niveau de cet examen, chacun de ces problèmes est accompagné de la question de cours correspondante.

Ce recueil de problèmes s'adresse également aux jeunes techniciens qui désirent s'élever au-dessus du niveau élémentaire de la connaissance qualitative.

Puisse cet ouvrage apporter une contribution utile à la formation d'une catégorie de personnel qui jouit à juste titre dans le public d'une faveur toute particulière.

SYMBOLES UTILISÉS



Les formules et les figures sont numérotées par chapitre; toute référence à une figure ou une formule d'un autre chapitre est faite par exemple sous la forme : figure ou formule (6-VII) = figure ou formule 6 du chapitre VII.

INTRODUCTION

RAPPELS DE NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE MATHÉMATIQUES.

Conseils aux candidats. — L'épreuve écrite, à l'examen d'Officier radiotélégraphiste de la Marine Marchande (1re classe), comporte en principe une question de cours et un problème; la durée de l'épreuve est comprise entre 1 h. 30 et 2 heures; la question de cours doit être traitée en deux ou trois pages, sans développements inutiles; les schémas doivent être clairs et précis. Avant d'aborder tout calcul dans le problème, le candidat procède à plusieurs lectures successives de l'énoncé afin d'en jauger toute l'étendue et les principales difficultés; il se réfère aux figures données dans le texte ou suggérées par ce texte; il aborde ensuite les réponses ou calculs se rapportant aux questions successives; c'est l'aspect physique du problème qui doit le guider dans la recherche des solutions; les relations de calcul étant établies avec les unités convenables, il reste à procéder aux opérations; celles-ci présentent un certain caractère d'automaticité : il ne faut pas que le candidat soit gêné dans l'exécution de ces opérations; il doit être rompu à l'utilisation des règles simples de l'arithmétique et de l'algèbre, aux méthodes de simplification des expressions, à l'extraction des racines carrées (opération la plus courante dans les problèmes de cet examen) etc; enfin, il ne doit pas accepter sans contrôle du bon sens le résultat final qui doit être en rapport avec les ordres de grandeur normalement rencontrés en pratique; ce résultat final doit être exprimé d'une façon simple, toutes opérations faites; sont à prohiber les présentations: $i = \frac{1}{\pi\sqrt{2}}$ Ampère au lieu de $i = 0{,}225$ A; celui qui corrige la copie n'a pas à vérifier des calculs incomplets; comment serait reçu l'acheteur qui demanderait : $\frac{1}{\pi\sqrt{2}}$ kilogramme de chocolat par exemple, au lieu de prosaïquement faire la commande de 225 grammes ? A signaler, enfin, qu'il n'est point nécessaire, dans un calcul, de donner un nombre de décimales hors de proportion avec l'approximation utile. Nous nous proposons dans cette introduction de rappeler quelques résultats utiles et de donner quelques applications correspondantes.

Quelques racines carrées utiles. — 1° Nous renvoyons aux livres d'arithmétique pour les règles d'extraction des racines carrées.

2° A connaître par cœur :

$$\sqrt{2} = 1{,}41 \; ; \qquad \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}707 \; ; \qquad \sqrt{3} = 1{,}73 \; ;$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}866 \; ; \qquad \sqrt{5} = 2{,}24 \; ; \qquad \sqrt{10} = 3{,}16.$$

Quelques nombres utiles. — $\pi = 3{,}14$; $\pi^2 = 9{,}87$ (en première approximation 10) ; $e = 2{,}72$.

Lignes trigonométriques utiles. — 1° Dans un triangle rectangle (fig. 1) le sinus d'un angle aigu (angle B p. ex.) est le rapport du côté AC, opposé à l'angle, à l'hypoténuse BC :

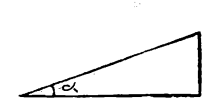


FIG. 1.

$$\sin \alpha = \frac{AC}{BC} \qquad [1]$$

le cosinus du même angle est le rapport du côté AB, adjacent à l'angle, à l'hypoténuse BC :

$$\cos \alpha = \frac{AB}{BC} \qquad [2]$$

la tangente du même angle est le rapport du côté opposé AC au côté adjacent AB; on a :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AC}{AB} = \frac{\dfrac{AC}{BC}}{\dfrac{AB}{BC}} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha}. \qquad [3]$$

Nous rappelons le théorème de Pythagore : dans un triangle rectangle, le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés :

$$BC^2 = AC^2 + AB^2 \qquad [4]$$

soit :

$$1 = \left(\frac{AC}{BC}\right)^2 + \left(\frac{AB}{BC}\right)$$

$$1 = \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \qquad [5]$$

2° Quelques valeurs utiles à retenir de mémoire :

angle α en degrés	0	30°	45°	60°	90°
angle en radians	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$
sin α	0	0,5	$\frac{\sqrt{2}}{2}=0,7$	$\frac{\sqrt{3}}{2}=0,86$	1
cos α	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}=0,86$	$\frac{\sqrt{2}}{2}=0,7$	0,5	0
tg α	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}=0,58$	1	$\sqrt{3}$	∞

Les formulaires donnent les valeurs des lignes trigonométriques pour les angles compris entre 0 et 90°; à noter que le sinus d'un angle est égal au cosinus de son complément et réciproquement :

$$\sin\alpha = \cos(90° - \alpha); \quad \cos\alpha = \sin(90° - \alpha).$$

Ex. $\sin 30° = \cos(90° - 30°) = \cos 60°$.

Fonction exponentielle et fonction logarithmique à base 10.

1° La fonction exponentielle à base 10 est représentée par l'expression :

$$y = 10^x \qquad [6]$$

définie sans ambiguïté quand x est entier positif; lorsque x est entier négatif, on a, par exemple $(x = -4)$:

$$10^{-4} = \frac{1}{10^4}$$

lorsque x est fractionnaire $\left(x = \frac{p}{q}\right)$, on a :

$$10^{\frac{p}{q}} = \sqrt[q]{10^p}$$

Par définition, x (relation [6]) est le logarithme du nombre y dans le système à base 10 (logarithme décimal) et l'on a :

$$x = \log_{10} y \qquad [7]$$

2° Rappelons les propriétés essentielles de la fonction logarithmique : — le logarithme d'un produit de deux nombres y_1 et y_2 est égal à la somme des logarithmes des deux nombres :

$$\log y_1 y_2 = \log y_1 + \log y_2 \qquad [8]$$

— le logarithme du quotient $\frac{y_1}{y_2}$ est :

$$\log \frac{y_1}{y_2} = \log y_1 - \log y_2 \qquad [9]$$

Valeur de référence (ou niveau zéro) du courant, de la tension et de la puissance le long d'une ligne téléphonique normale.

La valeur de référence de puissance *en téléphonie* est le milliwatt :

$$P_0 = 1 \text{ milliwatt.}$$

On cherche, en téléphonie, à réaliser des lignes équivalentes en tout point à une résistance de 600 ohms; les valeurs de référence de tension V_0 et de courant I_0 sont respectivement la tension aux bornes d'une résistance de 600 ohms et le courant dans ladite résistance siège d'une dissipation de puissance égale au niveau de référence de puissance $P_0 = 1$ milliwatt; on a donc :

$$\frac{U_0^2}{600} = \frac{1}{1\,000},$$

d'où : $U_0 = 0{,}775$ v $\qquad I_0 = \frac{U_0}{R} = \frac{0{,}775}{600} = 0{,}001\,29$ A.

Estimation du courant et de la tension en unités logarithmiques par rapport à un niveau de référence. — 1° L'estimation du courant I, de la tension U et de la puissance P en un point de la ligne peut être faite en donnant le rapport $\frac{I}{I_0}$, $\frac{U}{U_0}$ et $\frac{P}{P_0}$, les quantités I_0, U_0 et P_0 étant les niveaux de référence définis ci-dessus; on préfère, en pratique, définir comme suit les niveaux de courant, de tension et de puissance :

$$[10] \quad \left\{ \begin{array}{l} B_i = 20 \log \frac{I}{I_0} \\ B_t = 20 \log \frac{U}{U_0} \\ B_p = 10 \log \frac{P}{P_0} \end{array} \right. \quad \left| \begin{array}{l} \text{niveaux exprimés en décibels par rapport au} \\ \text{niveau zéro obtenu pour} \\ I = I_0, \quad U = U_0 \quad \text{et} \quad P = P_0. \end{array} \right.$$

A la seule condition que la ligne soit en tout point équivalente à une résistance, on a :

$$P = UI \qquad P_0 = U_0 I_0.$$

d'où :

$$B_p = 10 \log \left(\frac{U}{U_0} \times \frac{I}{I_0} \right) = \frac{1}{2} \left(B_t + B_i \right). \qquad [11]$$

Si la ligne considérée présente en tout point un prolongement équivalent à une résistance de 600 ohms, on a :

$$\frac{U}{I} = \frac{U_0}{I_0} = 600 \qquad \text{soit} \quad \frac{U}{U_0} = \frac{I}{I_0},$$

et :

$$B_t = B_i = B_p \; ; \qquad [12]$$

il y a égalité entre les niveaux de puissance, de tension et de courant; le choix des coefficients 20 et 10 dans les relations [10] est fait pour obtenir cette égalité; un même niveau de puissance et de tension répond, en raison des différences de définition, à des valeurs différentes de $\frac{P}{P_0}$ et $\frac{U}{U_0}$. L'annexe de la page 164 donne, en fonction du niveau exprimé en décibels, les valeurs correspondantes de $\frac{U}{U_0}$ (ou de $\frac{I}{I_0}$) et de $\frac{P}{P_0}$.

Niveau zéro ; niveau positif ou négatif : gains et pertes de niveau; addition des pertes et gains de niveau. — Le niveau zéro (de tension par exemple) correspond à $\frac{U}{U_0} = 1$; le niveau est positif lorsque U est supérieur à U_0; il y a *gain* de niveau par rapport au niveau zéro lorsque U est supérieur à U_0 ; lorsque U est inférieur à U_0, il y a *perte de niveau* ou *affaiblissement* par rapport au niveau zéro; un affaiblissement est un gain négatif. Une tension passe d'une valeur U_1 à l'entrée d'un organe d'une installation à la valeur U_2 à la sortie; le gain de niveau dans la traversée de l'organe est, en décibels :

$$B = 20 \log \frac{U_2}{U_1} = 20 \log \frac{\frac{U_2}{U_0}}{\frac{U_1}{U_0}} = B_2 - B_1$$

où B_1 et B_2 sont respectivement les niveaux de tension à l'entrée et à la sortie par rapport au *niveau zéro.*

Une certaine grandeur (tension par exemple) qui, à travers les organes successifs d'une installation, subit des gains (positifs ou négatifs) successifs B_1, B_2, B_3, etc., présente à l'extrémité, par rapport à l'origine, un gain :

$$B = B_1 + B_2 + B_3 + \ldots$$

Estimation d'une grandeur quelconque par rapport à une valeur de référence. — Il suffit de fixer la valeur de référence de cette grandeur, soit X_0, pour définir son niveau pour une valeur X par rapport au niveau zéro :

$$B = 20 \log \frac{X}{X_0} \text{ en décibels.}$$

APPLICATIONS.

1. ***Extraction de racines carrées.*** — 1° *Extraire les racines carrées des nombres suivants :*

a) (144)-(225)-(961)-(0,0144)-(0,0225)-(0,096 1) ;

b) (344 569)-(3 445,69)-(0,344 569) ;

c) $\sqrt{2 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^{2}}$; $\sqrt{\dfrac{4 \times 200 \times 10^{-6}}{0{,}5 \times 10^{-9}}}$

2° *Valeurs des quantités :*

$$2\pi \sqrt{0{,}5 \times 10^{-9} \times 200 \times 10^{-6}}$$
$$2\pi \sqrt{0{,}2 \times 10^{-9} \times 1{,}2 \times 10^{-6}}.$$

SOLUTION. — 1° *a*) (12) (15) (31) (0,12) (0,15) (0,31) ;

b) (587) (58,7) (0,587) ;

c) S'écrit : $\sqrt{2}\,\sqrt{3}\,\sqrt{10^{-4}} = 1{,}42 \times 1{,}73 \times 10^{-2}$ et 1 240 ;

d) (2×10^{-6}) et $(9{,}8 \times 10^{-8})$.

2. ***Lignes trigonométriques.*** — 1° *Calculer le côté l d'un carré dont la diagonale a* 150 *m ;*

2° *Dans le triangle de la figure* 1, *on a :* $\alpha = 30°$ AC = 50 *m ; calculez les deux autres côtés.*

3° *Dans le triangle de la figure* 1, *on a :* AC = 20 *m* ; BC = 35 *m, valeurs de AB et des angles ?*

SOLUTION. — 1° $l = 150 \sin 45° = 150 \times 0{,}707$;

$$2° \quad BC = \frac{AC}{\sin 30°} = \frac{50}{0{,}5} = 100 \text{ m} ;$$

$$AB = BC \cos 30° = 100 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 50 \times 1{,}73 = 86{,}5 \text{ m} ;$$

on a également : $AB = \dfrac{AC}{\operatorname{tg} 30^\circ} = \dfrac{50}{\dfrac{1}{\sqrt{3}}}$.

3° $AB = \sqrt{BC^2 - AC^2} = \sqrt{825} = 28{,}7$ m $\qquad \sin \alpha = \dfrac{20}{35} = 0{,}57$

$\alpha = 34^\circ 57'$ et l'autre angle $= 55^\circ 3'$

3. ***Fonction exponentielle et fonction logarithmique à base 10.*** — *Tracer la courbe des variations, en fonction du nombre* y, *de la quantité :*

$$x = \log y;$$

on déterminera les valeurs de y *correspondant aux valeurs de* x *multiples de* $\dfrac{1}{4}$ *comprises entre* -1 *et* $+1$.

SOLUTION. — On obtient, à partir de [6], le tableau suivant :

y	0,1	0,18	0,31	0,56	1	1,78	3,16	5,62	10	100
$x = \log y$	-1	$-\frac{3}{4}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{4}$	0	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1	2

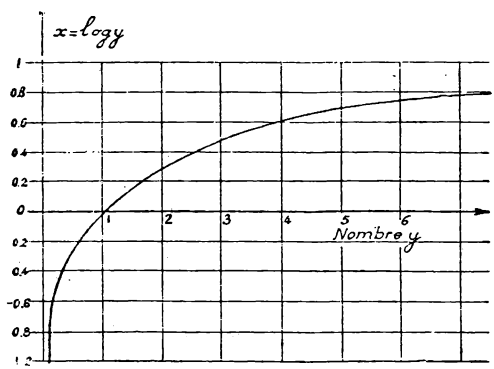


FIG. 2.

par exemple pour : $x = \dfrac{1}{2}$ $\qquad y = 10^{\frac{1}{2}} = \sqrt{10} = 3{,}16$

$x = \dfrac{1}{4}$ $\qquad y = \sqrt[4]{10} = 1{,}78$

$x = -\dfrac{1}{4}$ $\qquad y = \dfrac{1}{\sqrt[4]{10}} = \dfrac{1}{1{,}78} = 0{,}56$

La courbe demandée (fig. 2) montre que le logarithme, positif lorsque le nombre y est supérieur à 1, croît très lentement ensuite (passe de 1 à 2 lorsque y passe de 10 à 100); le logarithme est négatif et décroît de 0 à $-\infty$ lorsque le nombre décroît de 1 à 0.

4. *Ligne équivalente à une résistance quelconque.*

1° *Déterminer en décibels les niveaux de courant, de tension et de puissance en un point d'une ligne quelconque correspondant à des valeurs :*

$$U = 4 \text{ volts} \qquad I = 2 \text{ m A.}$$

2° *Les niveaux de puissance et de tension en un point d'une ligne quelconque sont respectivement égaux à 15 et 21 décibels; valeurs de la puissance transmise, de la tension et du courant en ce point; valeur du niveau de courant.*

SOLUTION. — 1° $\dfrac{U}{U_0} = \dfrac{4}{0{,}775} = 5{,}16.$

Le tableau de conversion (page 164) donne :

$$B_t = 14 \text{ décibels environ.}$$

On a, de même :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{2}{1{,}25} = 1{,}6 \qquad \text{d'où : } B_i = 4 \text{ décibels.}$$

$$P = UI = \frac{8}{1\,000} \text{ watt.}$$

$$\frac{P}{P_0} = 8 \text{ correspondant à un niveau de 9 décibels.}$$

2° Du tableau de conversion on déduit :

$$P = 31{,}62 \times \frac{1}{1\,000} \text{ watt;}$$

$$U = 11{,}22 \times 0{,}775 \text{ volts;}$$

$$I = \frac{P}{U} \text{ correspondant à un niveau : } B_i = 9 \text{ décibels.}$$

5. *Ligne normale.* — *Le niveau de tension en un point d'une ligne normale (équivalente à une résistance de 600 ohms) étant égal à 30 décibels, donner les valeurs : des niveaux de courant et de puissance; de la tension, du courant et de la puissance transmise.*

SOLUTION. — Avec une ligne normale on a : $B_t = B_i = B_p = 30$ db.

$$U = 31{,}62 \times 0{,}775 \text{ V.}$$

$$I = 31{,}62 \times 0{,}001\,29 \text{ A.}$$

$$P = 1\,000 \times \frac{1}{1\,000} = 1 \text{ watt.}$$

---

6. 1° *La ration quotidienne de référence en pain d'un Français étant fixée à un poids* $P_0 = 300$ *grammes pour la catégorie E, quels sont les gains positifs ou négatifs par rapport au niveau zéro ainsi défini des catégories touchant des rations quotidiennes P égales respectivement à* 200 *et* 500 *grammes; quelle est la perte de niveau de la ration pour un Français qui consommait* 400 *grammes avant la guerre; quel est l'accroissement prévu pour une consommation de* 800 *grammes en* 1949 (*il faut toujours être optimiste*) ?

2° *Un chapelier adopte comme tour de tête de référence une longueur de* 40 *centimètres; quel est le niveau d'un chapeau correspondant à un tour de tête de* 50 *centimètres ?*

SOLUTION :

1° $20 \log \frac{200}{300} = 20 \log \frac{2}{3} = -20 \log \frac{3}{2} = -4$ db environ.

$20 \log \frac{5}{3} =$ gain de 4,5 db.

$20 \log \frac{3}{4} = -2$ db environ.

$20 \log \frac{8}{3} = +8$ db environ.

2° $20 \log \frac{50}{40} = 2$ db. Le boulanger et le chapelier qui appréciaient les objets de leur commerce en décibels par rapport à des valeurs de référence ont fait faillite.

---

7. *On applique à l'entrée d'un amplificateur à trois lampes une tension* $U_0 = 95$ *microvolts; on recueille à la sortie des trois lampes des tensions*

$U_1 = 2.375\,\mu V$; $U_2 = 35.625\,\mu V$; $U_3 = 427.500\,\mu V$.

en adoptant comme valeur de référence la tension d'entrée U_0, *calculer le gain de chaque lampe et le gain total. Quelle est l'amplification d'un étage à lampe donnant un gain de* 21 *db ?*

SOLUTION :

$$\frac{U_1}{U_0} = 25 \qquad \frac{U_2}{U_1} = 15 \qquad \frac{U_3}{U_2} = 12 \qquad \frac{U_3}{U_0} = 4\,500$$

d'où les gains des trois étages : 28 db, 24 db et 22 db et le gain total $= 74$ db $= 20 \log 4\,500$.

Amplification : 11,22.

CHAPITRE PREMIER

RAPPELS D'ÉLECTRICITÉ.

I. *Self-induction d'un circuit. Induction mutuelle entre deux circuits.*

Coefficient d'induction mutuelle. — Le flux magnétique qui traverse un circuit est, pour un milieu à perméabilité constante, proportionnel au courant :

$$\Phi = 10^8 \, L \, I \quad \begin{cases} \Phi = \text{flux en maxwells;} \\ L = \text{coefficient de self-induction du circuit en henry;} \\ I \text{ en ampères.} \end{cases} \quad [1]$$

Unités pratiques en radioélectricité : le microhenry $= 10^{-6}$ henry; le centimètre; 1 henry $= 10^9$ centimètres.

Coefficient de self-induction d'une bobine longue. — $\left(\frac{D}{l} < 0{,}2\right)$ (fig. 1).

$$L = \frac{4\pi}{10^9} \times \frac{n^2 S}{l} \quad \begin{cases} L \text{ en henry;} \\ l \text{ en cm;} \\ S = \text{surface d'une spire en cm}^2\text{;} \\ n = \text{nombre de spires.} \end{cases} \quad [2]$$

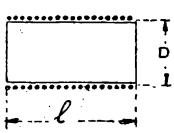


FIG. 1.

Dans le cas d'une bobine non longue, on multiplie le résultat de la formule [2] par un coefficient de Nagaoka, inférieur à 1 et donné par les formulaires en fonction de $\frac{D}{l}$.

Energie magnétique emmagasinée dans un circuit de self L siège d'un courant I.

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad \begin{cases} W_m \text{ en joules;} \\ L \text{ en henry;} \\ I \text{ en ampères.} \end{cases} \quad [3]$$

Induction mutuelle entre deux circuits. — Deux circuits fixes rapprochés, sièges de courants I_1 et I_2 estimés suivant des sens positifs fixes, sont traversés par des flux magnétiques :

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= 10^8 (L_1 I_1 + M I_2) \quad (\Phi_1 \text{ et } \Phi_2) \text{ en maxwells;} \\ \Phi_2 &= 10^8 (L_2 I_2 + M I_1) \quad (L_1, L_2 \text{ et } M) \text{ en henrys;}\end{aligned} \qquad [4]$$

M peut être positif ou négatif : la présence du circuit [2] peut renforcer ou diminuer le flux à travers le circuit [1].

Induction mutuelle maxima M_M entre deux circuits de selfs L_1 et L_2.

$$M_M = \sqrt{L_1 L_2}. \qquad [5]$$

Exemple : transformateur sans fuite.

Couplage des selfs.

1° En série :

a) *sans induction mutuelle :* $L = L_1 + L_2 + \ldots$ [6]

b) *avec induction mutuelle* (deux selfs) : $L = L_1 + L_2 + 2M$ [7]

M étant compris entre $-\sqrt{L_1 L_2}$ et $+\sqrt{L_1 L_2}$.

2° En parallèle :

a) *sans induction mutuelle :* $\dfrac{1}{l} = \dfrac{1}{L_1} + \dfrac{1}{L_2} + \ldots$ [8]

l est inférieur à la plus petite des selfs L_1, L_2, etc.;

si les n selfs sont égales ($L = L_1 = L_2 = \ldots$) on a :

$$l = \frac{L}{n} \qquad [9]$$

b) *avec induction mutuelle* (deux selfs) :

$$l = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \qquad [10]$$

où M est compris entre $-\sqrt{L_1 L_2}$ et $+\sqrt{L_1 L_2}$;

(voir, application n° 2, la loi des variations de l en fonction de M : le maximum de l est égal à la plus petite des deux selfs, soit L_2 ; il est obtenu pour $M = L_2$).

Bobinages utilisés en radioélectricité :

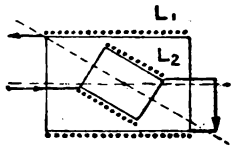


FIG. 2.

1° *A self fixe.* Bobines circulaires, en nid d'abeilles ou en fond de panier;

2° *A self variable d'une façon continue* (*variomètre*). Deux bobines de selfs L_1 et L_2 (fig. 2) branchées en série ou en parallèle dont on fait varier l'induction mutuelle par un mouvement de rotation; la self résultante varie suivant les indications du paragraphe précédent.

II. *Capacité entre conducteurs.*

Capacité d'un condensateur. — Les charges opposées $\mp Q$ des deux armatures sont proportionnelles à la différence de potentiel V :

$$Q = CV \quad \begin{cases} Q \text{ en coulomb;} \\ V \text{ en volts;} \\ C \text{ en farad.} \end{cases} \qquad [11]$$

Unités pratiques : le *millième* de microfarad $= 10^{-9}$ farad;
le *centimètre* capacité; 1 farad $= 9 \times 10^{11}$ centimètres.

Capacité d'un condensateur de dimensions données (fig. 3).

$$C = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \frac{KS}{4\pi e} \quad \begin{cases} C \text{ en farad;} \\ S = \text{surface active de chaque armature en cm}^2; \\ e \text{ en cm;} \\ K \text{ caractérise l'isolant et s'appelle le pouvoir inducteur spécifique.} \end{cases} \qquad [12]$$

Quand e tend vers zéro, C croît indéfiniment et $\frac{1}{C}$ tend vers zéro : un circuit ne comportant point de condensateur (les deux armatures se touchent et $e = 0$) est tel que :

$$\frac{1}{C} = 0.$$

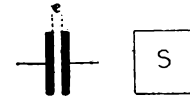


FIG. 3.

Energie électrique emmagasinée dans un condensateur.

$$W_e = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad \begin{cases} W_e \text{ en joules;} \\ Q \text{ en coulomb;} \\ V \text{ en volts;} \\ C \text{ en farad.} \end{cases} \qquad [13]$$

Rigidité diélectrique d'un isolant. — C'est, exprimée en kilovolts par centimètre, la différence de potentiel maxima que peut supporter une plaque de 1 cm d'épaisseur de l'isolant; on admet, en première approximation, la proportionnalité entre la tension disruptive V_M et l'épaisseur e d'une plaque :

$$V_M = 1\,000\ ae \begin{cases} V_M \text{ en volts;} \\ a \text{ en kV/cm;} \\ e \text{ en cm.} \end{cases} \qquad [14]$$

Energie maxima W_M que peut emmagasiner un condensateur.

$W_M = \frac{1}{2} CV^2_M$ où C est donné par [12] et V_M par [14];

$$= \left(\frac{1}{2} \times \frac{1}{9 \times 10^5} \times \frac{K a^2}{4\pi}\right) V' \qquad [15]$$

où $V' = Se$ = volume du diélectrique intéressé; en gros, l'énergie maxima que peut emmagasiner un condensateur comportant un diélectrique donné est proportionnelle au volume du diélectrique ou du condensateur.

Groupement des condensateurs.

1° En parallèle (fig. 4) :

$$C = C_1 + C_2 + \ldots \qquad [16]$$

Chaque condensateur supporte la tension *totale* de la source.

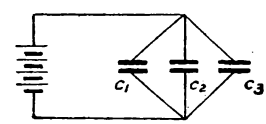


Fig. 4.

2° En série (fig. 5) :

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots \qquad [17]$$

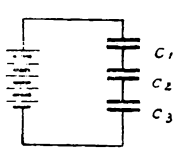


Fig. 5.

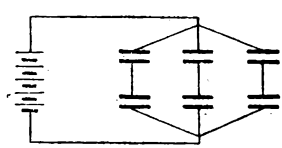


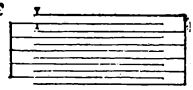
Fig. 6.

c est inférieur à la plus petite des capacités C_1, C_2, etc.; dans le cas de n condensateurs C, on a :

$$c = \frac{C}{n} \qquad [18]$$

et la tension totale appliquée à la batterie se partage à égalité entre les condensateurs.

3° En séries parallèles (fig. 6). — On calcule la capacité de chaque série et l'on ajoute les résultats obtenus.



Condensateurs utilisés en radioélectricité.

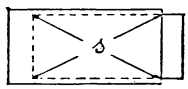


Fig. 7.

1° *A capacité fixe* (fig. 7). — Les lames d'une armature sont imbriquées entre les lames de l'autre armature; la capacité C se calcule à partir de [12], la surface S étant donnée par :

$$S = (N - 1)\, s \quad \begin{cases} N = \text{somme des lames des deux armatures;} \\ s = \text{surface active de deux lames en présence.} \end{cases} \qquad [19]$$

2° *A capacité variable.* — *a*) Capacité proportionnelle à l'angle de rotation α : lames mobiles à profil circulaire (fig. 8).

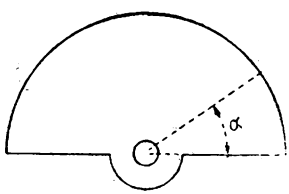


Fig. 8.

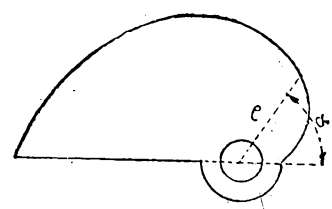


Fig. 9.

b) Capacité proportionnelle au carré α^2 de l'angle de rotation : profil des lames en spirale (fig. 9).

APPLICATIONS.

I. Self-induction et induction mutuelle.

1. ***Calcul du coefficient de self-induction d'une bobine longue.*** — *Une bobine circulaire dont les dimensions sont* (fig. 1) *:* $D = 5$ *cm,* $l = 10$ *cm, comporte* $n = 100$ *spires en fil de cuivre de* 1 *mm de diamètre :*

1° *Calculer la résistance R de la bobine (résistivité du cuivre* $= 1{,}6$ *microhms-centimètre);*

2° *Calculer le courant débité dans la bobine par une batterie de trois piles en série (f.é.m. d'un élément* $= 1{,}3$ *volt; résistance intérieure d'un élément* $= 0{,}1$ *ohm);*

3° *Valeur du flux magnétique qui traverse la bobine;*

4° *Valeur du coefficient de self-induction L_1 de la bobine;*

5° *Valeur de l'énergie magnétique;*

6° *On enroule une deuxième couche sur la première comportant* 200 *spires : valeur de la self du nouveau bobinage et de l'induction mutuelle entre les deux couches.*

SOLUTION :

1° La longueur du fil est :

$$\pi D \times 100 = \pi \times 5 \times 100$$

et sa section en cm² : $s = \dfrac{\pi \times 0{,}1^2}{4}$,

d'où : $R = \dfrac{1{,}6}{10^6} \times \dfrac{\pi \times 5 \times 100}{s} = 0{,}32$ ohm.

2° On a : $I = \dfrac{3 \times 1{,}3}{0{,}32 + 3 \times 0{,}1} = 6{,}29$ ampères.

3° Le champ magnétique dans la bobine a pour valeur :

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{n}{l} = \frac{4\pi}{10} \times \frac{100 \times 6{,}29}{10}$$

le flux à travers les 100 spires est :

$$\Phi = \pi \frac{D^2}{4} \times H \times n = 156\,000 \text{ maxwells.}$$

4° On a, par application de [1] :

$$L_1 = \frac{156\,000}{10^8 \times 6{,}29} \text{ soit } 247 \text{ microhenrys;}$$

en fait, si l'on tient compte du coefficient de Nagaoka, égal à 0,818 pour la valeur $\dfrac{D}{l} = \dfrac{5}{10} = 0{,}5$, on obtient la valeur plus exacte :

$$L_1 = 247 \times 0{,}818 = 202 \text{ microhenrys.}$$

5° $W_m = \dfrac{1}{2} \times \dfrac{202}{10^6} \times (6{,}29)^2$ soit 4 000 microjoules.

6° $L = 3^2 \times 202 = 1\,818\ \mu Hs$; la self de la deuxième couche seule est : $L_2 = 2^2 \times 202 = 808\ \mu Hs$; l'induction mutuelle :

$$M = \sqrt{202 \times 808} = 202 \times 2; \text{ L se déduit de [7].}$$

2. ***Le variomètre.*** — *Le variomètre d'un poste de réception comporte deux bobines circulaires dont les caractéristiques sont les suivantes :*

Bobine externe : *diamètre :* 10 *cm; longueur :* 10 *cm;* 150 *spires;*

Bobine interne : *diamètre :* 5 *cm* ; *longueur :* 6 *cm;* 100 *spires jointives.*

1° *Calculer les selfs* L_1 *et* L_2 *des deux bobines (le coefficient de Nagaoka est respectivement égal à* 0,688 *et* 0,728 *pour l'une et l'autre bobine).*

2° *Calculer les limites extrêmes entre lesquelles est comprise la self équivalente à celle des deux enroulements en série.*

3° *Valeur de la self équivalente lorsque les deux enroulements sont disposés en parallèle avec une induction mutuelle nulle; variations en fonction de M de la self-induction du variomètre, les enroulements étant disposés successivement en série et en parallèle.*

SOLUTION :

1° $L_1 = 2\,250$ $L_2 = 400$ en microhenrys;

2° Induction mutuelle théorique maxima :

$$M_M = \sqrt{2\,250 \times 400} = 940 \text{ microhenrys;}$$

la self du variomètre est obligatoirement comprise entre :

$(L_1 + L_2 - 2M_M)$, soit 770 microhenrys et

$(L_1 + L_2 + 2M_M)$, soit 4 530 microhenrys.

En réalité les formes géométriques du variomètre ne permettent point d'obtenir l'induction mutuelle de 940 microhenrys.

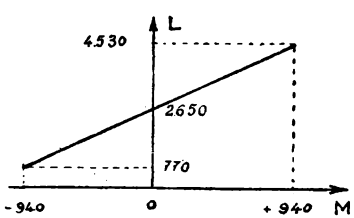


FIG. 10.

3° *a*) La self l du variomètre est telle que :

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{2\,250} + \frac{1}{400}$$

d'où : $l = 340$ microhenrys.

b) Bobines en série :

$$L = L_1 + L_2 + 2M = 2\,650 + 2M;$$

L varie linéairement en fonction de M (fig. 10) qui varie entre $-M_M$ et $+M_M$.

c) Bobines en parallèle :

$$L = \frac{2\,250 \times 400 - M^2}{(2\,650 - 2M)},$$

la loi des variations de L en fonction de M est donnée à la figure 11; le maximum de L, égal à la plus petite des deux selfs, soit à L_2, est obtenu pour $M = L_2$.

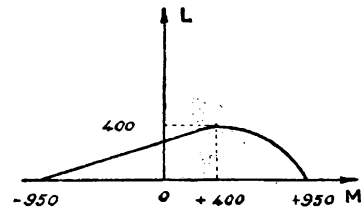


FIG. 11.

N. B. — En fait, les formes géométriques des bobines ne permettent point d'atteindre l'induction mutuelle M_M; on se rapproche de cette valeur avec un variomètre sphérique.

---

3. *Un enroulement primaire présentant une self* $L_1 = 100$ *microhenrys est disposé en série avec un enroulement secondaire de self* $L_2 = 240$ *microhenrys; une mesure donne pour valeur de la self-induction de l'ensemble :* 146 *microhenrys.*

1° *Valeur de l'induction mutuelle entre* L_1 *et* L_2*;*

2° *Quelle valeur de self-induction obtient-on pour l'ensemble si l'on permute les extrémités d'une bobine ?*

SOLUTION :

1° $146 = 100 + 240 + 2M$,

d'où : $M = -97$ microhenrys.

2° $L = 100 + 240 + 2 \times 97 = 534$ microhenrys.

4. ***Construction d'un condensateur fixe.*** — *On désire construire un condensateur fixe de réception de capacité égale à un millième de microfarad. On utilise du papier d'étain pour constituer les armatures et des feuilles de papier de deux dixièmes de millimètre d'épaisseur pour séparer les armatures; le pouvoir inducteur spécifique du papier est égal à* 2,1.

a) *Calculer la surface de chacune des armatures.*

b) *On constitue chacune de celles-ci de plusieurs feuilles dont la forme de principe est indiquée* (1) *sur la figure* 7. *Combien de feuilles faut-il adopter ?*

La surface *s* est celle d'un rectangle de (2,5 × 3) cm².

SOLUTION :

On calcule la surface S de chaque armature :

$$\frac{1}{1\,000} = \frac{2{,}1 \times S}{4\pi \times \frac{2}{100}} \times \frac{1}{9 \times 10^5}.$$

D'où $S = 108\ cm^2$; si l'on adopte des feuilles d'étain montées comme il est représenté sur la figure 7, une feuille d'une armature comprise entre deux feuilles de l'autre correspond à une surface de :

$$2{,}5 \times 3 \times 2 = 15\ cm^2 \quad \text{et il faudrait} \quad \frac{108}{15} = 7 \text{ feuilles}$$

pour une armature. Comme il faut que les deux faces de chaque feuille de cette armature soient utilisées, l'autre armature doit comporter 8 feuilles.

5. ***Construction d'un condensateur variable.*** — *On désire construire un condensateur variable de capacité maxima égale à* $\frac{0{,}35}{1\,000}$ *à lames semi-circulaires; nombre de lames à adopter sachant que les lames semi-circulaires ont un rayon de* 3 *cm et présentent un espacement de de* 0,07 *cm avec les lames fixes.*

SOLUTION. — La surface active S de chaque armature est telle que :

$$\frac{0{,}35}{10^9} = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \times \frac{S}{4\pi \times 0{,}07}.$$

d'où : $S = 277\ cm^2$.

et : $$S = 277 = (N - 1)\, s = (N - 1) \times \frac{\pi \times 3^2}{2},$$

soit : $N = 20$ environ.

6. ***Le condensateur d'émission.*** — *Le condensateur du circuit oscillant d'un poste d'émission à ondes amorties possède deux armatures constituées l'une par* 11 *plaques, l'autre par* 12 *plaques d'aluminium de* $\frac{3}{10}$ *de millimètre d'épaisseur; les* 11 *plaques de la première armature sont intercalées chacune entre deux des douze plaques de l'autre armature dont elles sont séparées par des plaques de verre de* 3,9 *millimètres d'épaisseur; le tout est noyé dans un bain de pétrole; deux plaques consécutives ont en regard une surface de* 13×18 *centimètres. Calculer :*

a) *La capacité du condensateur; le pouvoir inducteur spécifique du verre utilisé est égal à* 7;

b) *La différence de potentiel maximum que peut supporter le condensateur sachant que le coefficient de rigidité diélectrique du verre est égal à 285 kilovolts-centimètre;*

c) *L'énergie maximum que peut emmagasiner le condensateur.*

d) *Le condensateur est chargé et déchargé 1 000 fois par seconde. Calculer la puissance mise en jeu, le potentiel de charge étant égal à 10 000 volts.*

SOLUTION :

a) On a : $S = (N - 1)\, s = 22 \times 13 \times 18 = 5\,148\ cm^2$,

d'où :

$$C = \frac{1}{9 \times 10^5} \times \frac{7 \times 5\,148}{4\pi \times \frac{3,9}{10}} = \frac{8,17}{1\,000} \text{ de microfarad.}$$

b et *c*) On a : $W_M = \frac{1}{2} C V^2_M$,

avec : $V_M = 285\,000 \times \frac{3,9}{10}$ soit 110 000 volts,

d'où : $W_M = \frac{1}{2} \frac{8,17}{10^9} \times (110\,000)^2 = 49,4$ joules.

d) Chaque décharge met en jeu une énergie :

$$W = \frac{1}{2} \frac{8,17}{10^9} \times 10\,000^2 = 0,408 \text{ joule,}$$

d'où, à raison de 1 000 décharges par seconde, une puissance :

$$P = 408 \text{ watts.}$$

CHAPITRE II

COURANTS SINUSOÏDAUX. COURANTS MODULÉS TÉLÉPHONIQUEMENT.

1° *Courants sinusoïdaux.*

Force électromotrice sinusoïdale. — Toute f.é.m. sinusoïdale est caractérisée (fig. 1) :

1° par son *amplitude* E_m exprimée en volts;

2° par sa *période* T ou par sa *fréquence* N ou par sa pulsation ω; on a :

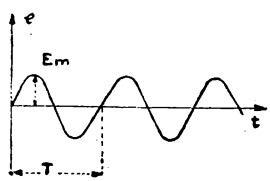


FIG. 1.

$$\omega = 2\pi N = \frac{2\pi}{T} \qquad [1]$$

L'expression d'une f.é.m. sinusoïdale en fonction du temps est :

$$e = E_m \sin 2\pi \frac{t}{T} = E_m \sin \omega t \qquad [2]$$

Classification des f.é.m. sinusoïdales d'après leur fréquence. — Une f.é.m. constante peut être considérée comme présentant une période T infinie ou une fréquence nulle.

1° *Fréquences industrielles :* 16 - 25 - 42 -50 - et 60;

2° *Fréquences téléphoniques :*

En radiotéléphonie commerciale, de 250 à 3 000 environ; il s'agit de conserver les composantes utiles à une reproduction *compréhensible* de la voix;

En radiodiffusion téléphonique, de 15 à 10 000 environ; il s'agit de conserver les composantes utiles à une reproduction *artistique* des émissions;

3° *Hautes fréquences,* utilisées en radioélectricité, de 10 000 à 3×10^{10}; c'est à la haute fréquence que doit être attribué le phénomène du rayonnement.

La fréquence est exprimée suivant le cas en *cycles* par seconde (c/s) en *kilocycles* ou en *mégacycles* par seconde (kc/s et Mc/s).

Valeur efficace d'un courant, d'une f.é.m ou d'une différence de potentiel. — Un courant sinusoïdal d'amplitude I_m est équivalent, du point de vue calorifique, à un courant continu de valeur :

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}7071\, I_m. \qquad [3]$$

Puissance dissipée dans une résistance R siège d'un courant sinusoïdal I :

$$P = R\, I^2 \quad \begin{cases} P \text{ en watts;} \\ R \text{ en ohms;} \\ I \text{ en ampères.} \end{cases} \qquad [4]$$

Par définition, on appelle valeurs efficaces d'une f.é.m. sinusoïdale ou d'une tension sinusoïdale les quantités :

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \qquad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \qquad U_m = \text{amplitude de la tension.} \qquad [5]$$

Courant produit dans un circuit simple (fig. 2) par une f.é.m sinusoïdale.

1° On donne :

— l'expression [2] de la f.é.m.;

— R en ohms, C en farad et L en henry;

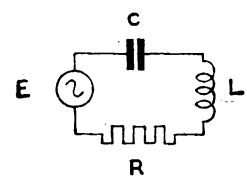


FIG. 2.

le courant i présente l'expression :

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) \qquad [6]$$

où l'amplitude I_m correspond à une valeur efficace :

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} \quad \begin{cases} I \text{ en ampères;} \\ E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} \text{ en volts;} \end{cases} \qquad [7]$$

la quantité $Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$ exprimée en ohms et dont la valeur limite le courant résulte de l'effet de résistance et de l'effet combiné de la self et de la capacité; Z est *l'impédance* du circuit, $L\omega$ la *réactance* de self, $-\frac{1}{C\omega}$ la *réactance* de capacité et $\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$ la réactance totale du circuit; ces quantités sont exprimées en ohms.

Le déphasage φ du courant sur la f.é.m. est tel que :

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R} \qquad [8]$$

φ est négatif et le courant est déphasé en avant sur la f.é.m. lorsque le numérateur de [8] est négatif.

Puissance P livrée par une source de f.é.m. sinusoïdale.

Quelle que soit la nature du circuit de débit, on a :

$$P = EI\cos\varphi \quad \begin{cases} P \text{ en watts;} \\ E \text{ en volts;} \\ I \text{ en ampères;} \\ \varphi = \text{déphasage du courant sur la f.é.m.} \end{cases} \qquad [9]$$

Cas particuliers déduits de la formule [7] :

1° *Résistance* (fig. 3) : $L = 0$ $\frac{1}{C} = 0$

$$I = \frac{E}{R} \qquad \varphi = 0; \qquad [10]$$

2° *Self* (fig. 4) :

$$I = \frac{E}{L\omega} \qquad \varphi = \frac{\pi}{2} \text{ (retard de 1/4 période)} \qquad [11]$$

la puissance livrée par la source est nulle : il y a échange d'énergie entre la source et la self.

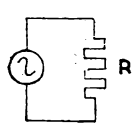


Fig. 3.

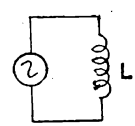


Fig. 4.

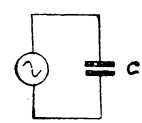


Fig. 5.

3° *Capacité* (fig. 5) : $(R = L = 0)$

$$I = \frac{E}{\frac{1}{C\omega}} = CE\omega \qquad \varphi = -\frac{\pi}{2} \text{ (avance de 1/4 période)} \qquad [12]$$

la puissance livrée par la source est nulle : il y a, alternativement, charge et décharge du condensateur.

Remarque. — Les relations [7] à [12] sont valables si l'on remplace la f.é.m. E par la tension U appliquée au circuit ou à la portion de circuit; de toute façon, la tension U aux bornes d'un organe est égale au produit du courant qui le traverse par son impédance :

$$V\,(\text{volts}) = Z\,(\text{ohms}) \times I\,(\text{ampères})$$

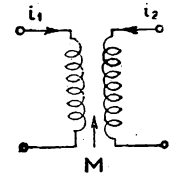


FIG. 6.

F.é.m. sinusoïdale d'induction mutuelle (fig. 6). — Les courants I_1 et I_2 existant dans les circuits après rapprochement donnent naissance à des f.é.m. d'induction mutuelle :

dans le circuit (1) : $E_1 = M\omega I_2$
dans le circuit (2) : $E_2 = M\omega I_1$

E_1 et E_2 en volts; M en henry; I_1 et I_2 en ampères. [13]

Courant de H.F. dont l'amplitude est modulée à une fréquence téléphonique.

1° *Définition* (fig. 7); *taux de modulation.* — L'expression de ce courant est :

$$i = [I\,(1 + M \sin \Omega t)] \sin \omega t$$

ω = pulsation H.F.; Ω = pulsation téléphonique; M = taux de modulation compris entre 0 et 1. [14]

C'est un courant dont l'amplitude $[I\,(1 + M \sin \Omega t)]$ varie à la pulsation Ω entre un minimum $I_1 = I\,(1 - M)$ en *creux* de modulation et un

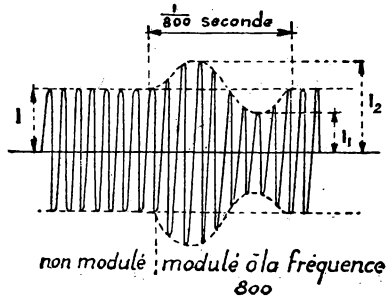


FIG. 7.

maximum $I_2 = I\,(1 + M)$ en *crête* de modulation; le taux de modulation M représente de ce fait le rapport de la variation maxima d'amplitude $(I_2 - I) = (I - I_1)$ autour de l'amplitude moyenne à l'amplitude moyenne I:

$$M = \frac{I_2 - I}{I} = \frac{I - I_1}{I}\ ;\ M \text{ s'exprime en } \%. \qquad [15]$$

2° *Décomposition d'un courant modulé en trois composantes sinusoïdales.* L'expression [14] s'écrit :

$$i = I \sin \omega t + \frac{MI}{2} \cos (\omega - \Omega)t - \frac{MI}{2} \cos (\omega + \Omega)t \qquad [16]$$

i est la somme de trois courants sinusoïdaux :

— un courant porteur de pulsation ω (fréquence porteuse);

— deux courants de pulsations $(\omega - \Omega)$ et $(\omega + \Omega)$ (fréquences latérales).

3° *Puissance dissipée dans une résistance siège d'un courant modulé :*

a) en régime d'onde porteuse, le courant $I \sin \omega t$ à travers une résistance R dissipe une puissance :

$$P_p = \frac{RI^2}{2}; \qquad [17]$$

b) lors d'une modulation, la puissance P_m dissipée dans la même résistance est égale à la somme des puissances dissipées par les trois composantes données par [16] :

$$P_m = \frac{RI^2}{2} + \frac{R\left(\frac{MI}{2}\right)^2}{2} + \frac{R\left(\frac{MI}{2}\right)^2}{2} = P_p \left(1 + \frac{M^2}{2}\right); \qquad [18]$$

c) la puissance instantanée prise en pointe des alternances H.F. varie entre :

$RI^2(1 + M)^2$ en crête de modulation et $RI^2(1 - M)^2$ en creux, soit, pour $M = 100\ \%$, entre $8\,P_p$ et 0.

Courant de H.F. modulé téléphoniquement en amplitude. — L'amplitude du courant H.F. varie au rythme du courant téléphonique modulateur; en radiotéléphonie commerciale, répondant à des fréquences comprises entre 250 et 3 000, l'émission s'étale de 3 kc/s de part et d'autre de la porteuse (canal de 6 kc/s); le canal est de 10 kc/s de part et d'autre de la porteuse en radiodiffusion.

APPLICATIONS.

1. *Réactance de self et de capacité.*

1° *Tracer en fonction de la pulsation* ω *les courbes de variations de la réactance en ohms d'une self de* 377 *microhenrys, d'une capacité de* $\frac{2{,}35}{1\,000}$ *de microfarad et du système constitué de la susdite self en série avec la susdite capacité* (fig. 8).

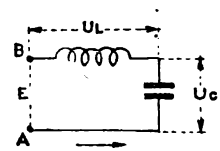


FIG. 8.

2° *Une f.é.m. sinusoïdale de* 100 *volts et de pulsation* ω *agit sur le système; tracer la courbe des variations de courant I en fonction de* ω.

3° *Valeurs du courant, des tensions aux bornes de C et L et diagramme des vecteurs pour les fréquences* 168 000 *et* 176 000.

SOLUTION :

La droite OA et l'arc d'hyperbole BCD (fig. 9) donnent respectivement les courbes d'équation :

$$y_1 = L\omega$$

$$y_2 = -\frac{1}{C\omega}$$

en additionnant algébriquement les réactances $(y_1 + y_2)$, on obtient la courbe FGH donnant la réactance du système; pour les fréquences basses,

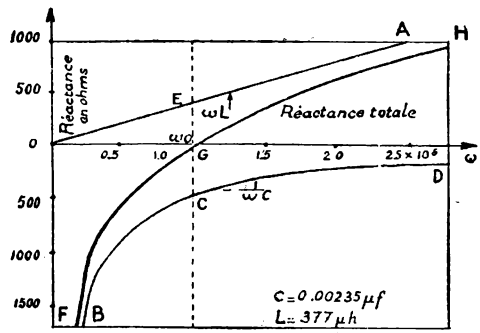


FIG. 9.

seule intervient en pratique la réactance $-\frac{1}{C\omega}$ et les deux courbes en B et F tendent à se confondre; pour les fréquences élevées, la réactance $\frac{1}{C\omega}$

est négligeable vis-à-vis de $L\omega$ et la courbe FGH est asymptote à la droite OA; enfin, pour la pulsation ω_0 telle que l'on ait :

$$L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} = 0 \qquad \text{soit } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL}}$$

la courbe FGH coupe en G l'axe des ω;

avec les valeurs indiquées on a :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{2{,}33}{10^9} \times \frac{377}{10^6}}} = 1\,062\,600$$

correspondant à la fréquence :

$$N_0 = \frac{1\,062\,600}{6{,}28} = 169\,200.$$

2° Le courant a pour valeur :

$$I = \frac{100}{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)} \text{ ampères;}$$

la connaissance, à partir de la courbe FGH (fig. 9), des variations de la réactance en fonction de ω permet de tracer (fig. 10) la courbe OHKL des variations correspondantes de I : pour les pulsations inférieures à

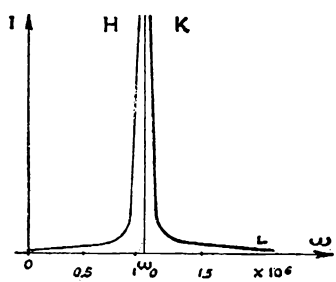


FIG. 10.

ω_0 le système se comporte comme une capacité et le courant est en avance de 1/4 de période sur la f.é.m.; pour les pulsations supérieures à ω_0, le système se comporte comme une self et le courant est en retard de 1/4 de période sur la f.é.m.

3° *Pour* $N = 168\,000$ $\quad L\omega = 397$ ohms $\quad \dfrac{1}{C\omega} = 403$ ohms;

$$I = \frac{100}{6} = 16{,}6 \text{ ampères};$$

$$U_C = \frac{I}{C\omega} = 403 \times 16{,}6 = 6\,690 \text{ volts};$$

$$U_L = L\omega I = 397 \times 16{,}6 = 6\,590 \text{ volts}.$$

La figure 11 donne le diagramme des vecteurs : origine des phases le courant I qui traverse C et L; le vecteur tension aux bornes E = 100 volts est la somme géométrique (différence arithmétique) entre $U_C =$

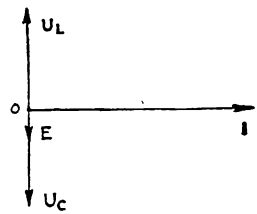


FIG. 11.

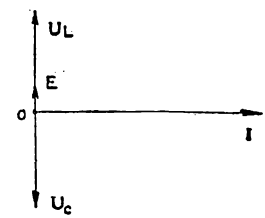


FIG. 12.

6 690 volts et $U_L = 6\,590$ volts; I étant en avance sur E, le système se comporte vis-à-vis de la source comme une capacité C_1 telle que :

$$\frac{1}{C_1\,\omega} = \left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right) = 6 \qquad C_1 = \frac{158}{1\,000} \text{ microfarad.}$$

Pour $N = 176\,000$ $\quad L\omega = 417$ ohms $\quad \dfrac{1}{C\omega} = 384$ ohms

$$I = \frac{100}{33} = 3{,}03 \text{ ampères.}$$

$U_L = 1\,263$ volts $\qquad U_C = 1\,163$ volts.

Diagramme des vecteurs à la figure 12 : le système est équivalent à une self L_1 telle que :

$$L_1\,\omega = 33 \qquad L_1 = 30 \text{ microhenrys environ.}$$

2. ***Action d'une f.é.m. sinusoïdale sur un circuit comportant en série une self, une capacité et une résistance.*** — *Une source de f.é.m. sinusoïdale égale à* 500 *microvolts, de fréquence* 100 000, *débite*

sur un circuit comportant en série (fig. 13) une self de 1 000 microhenrys, une capacité de $\frac{2{,}65}{1\,000}$ *de microfarad et une résistance de 50 ohms.*

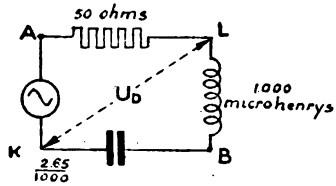


FIG. 13.

Calculer :

1° *l'intensité du courant;*

2° *les différences de potentiel aux bornes de la self, du condensateur, de la résistance et entre les points A et B;*

3° *la puissance dissipée dans le circuit;*

4° *diagramme des vecteurs de répartition des tensions.*

SOLUTION :

On a : $L\omega = \frac{1\,000}{10^6} \times 2\pi \times 100\,000 = 628$ ohms.

$$\frac{1}{C\omega} = \frac{1}{\frac{2{,}65}{10^9} \times 2\pi \times 100\,000} = 602 \text{ ohms.}$$

d'où : $Z = \sqrt{50^2 + 26^2} = 56{,}2$ ohms

et le courant : $I = \frac{500}{56{,}2} = 8{,}9$ microampères

ce courant est en retard sur la f.é.m d'un angle φ tel que :

$$\text{tg } \varphi = \frac{26}{50} = 0{,}52$$

$$\varphi = 27° 30'$$

correspondant à un peu moins de $\frac{1}{12}$ de période.

2° $U_L = L\,\omega\,I = 628 \times 8{,}9 = 5\,580$ microvolts;

$U_C = \frac{1}{C\omega} \times I = 602 \times 8{,}9 = 5\,400$ microvolts;

$U_R = RI = 50 \times 8{,}9 = 445$ microvolts;

tension entre A et B :

$$U_{AB} = \sqrt{R^2 + L^2\,\omega^2} \times I = \sqrt{50^2 + 628^2} \times 8{,}9 = 5\,600 \text{ microvolts.}$$

3° La puissance fournie par la source, soit EI cos φ, apparaît sous forme de chaleur dans R :

$$P = 50 \times \left(\frac{8{,}9}{10^6}\right)^2 = \frac{4\,000}{10^{12}} = 4\,000 \text{ micromicrowatts.}$$

4° Diagramme des vecteurs (fig. 14).

Origine des phases : courant I.

$U_D = (U_L - U_C)$ = tension entre K et L;

la f.é.m. est la somme géométrique de U_L, U_C et U_R ; le courant I est en retard sur E de l'angle $\widehat{EOI} = \varphi = 27° 30'$.

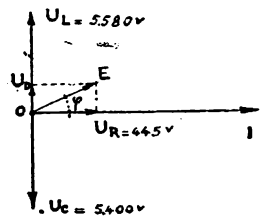


Fig. 14.

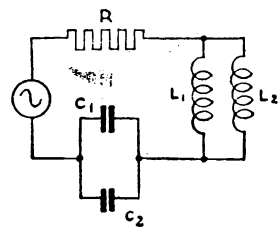


Fig. 15.

3. ***Groupements de selfs et de capacités en courants sinusoïdaux.*** — *On donne le système de la figure* 15 *où :*

$E = 50$ *microvolts-fréquence* 100 000;

$R = 50$ *ohms;*

$L_1 = 1\,000$ *microhenrys;*

$L_2 = 1\,500$ *microhenrys* (*induction mutuelle nulle entre* L_1 *et* L_2);

$C_1 = \dfrac{2{,}65}{1\,000}$ *microfarad;*

$C_2 = \dfrac{2}{1\,000}$ *microfarad.*

Calculer :

1° *le courant débité par la source;*

2° *les différences de potentiel aux bornes des divers organes et les courants à travers chaque bobine et chaque condensateur.*

Solution :

1° Self équivalente L :

$$L = \frac{1\,000 \times 1\,500}{2\,500} = 600 \text{ microhenrys;}$$

capacité équivalente :

$$C = \frac{4{,}65}{1\,000} \text{ microfarad;}$$

impédance totale du circuit :

$$Z = \sqrt{50^2 + \left(\frac{600}{10^6} \times 2\pi \times 10^5 - \frac{1}{\frac{4{,}65}{10^9} \times 2\pi \times 10^5}\right)^2}$$

$$= \sqrt{50^2 + (377 - 342)^2} = 61 \text{ ohms;}$$

d'où le courant : $I = \frac{500}{61} = 8{,}2$ microampères.

2° $U_L = L\,\omega\,I = 3\,220$ microvolts.

Courant dans L_1 :

$$I_{L_1} = \frac{U_L}{L_1\,\omega} = \frac{3220}{\frac{1\,000}{10^6} \times 2\pi \times 10^6} = 5{,}1 \text{ microampères.}$$

Courant dans L_2 :

$I_{L_2} = 3{,}1$ microampères.

$$U_C = \frac{I}{C\omega} = \frac{8{,}2}{\frac{4{,}65}{10^5} \times 2\pi \times 10^5} = 2\,804 \text{ microvolts.}$$

Courant dans C_1 :

$$I_{C_1} = U_C \times C_1\,\omega = 2\,804 \times \frac{2{,}65 \times 2\pi \times 100\,000}{10^9} = 4{,}66 \text{ microampères.}$$

Courant dans C_2 : $I_{C_2} = 3{,}54$ microampères.

4. ***Puissance en courant modulé.*** — *L'antenne d'un poste d'émission de radiodiffusion présente une résistance de* 16 *ohms :*

1° *Calculer la puissance mise en jeu dans l'antenne en l'absence de modulation pour un courant à la base* $I_p = 90$ *ampères; même question lorsqu'on module le courant à des taux de* 30 %, 60 % et 100 % *pour une même amplitude de courant porteur.*

2° *Calculer dans ces divers cas le maximum et le minimum de la puissance moyenne par période de la fréquence porteuse.*

3° *Limites extrêmes entre lesquelles varient les maxima de la puissance instantanée pour les divers taux de modulation.*

4° *Expression du courant modulé à* 30 % *à la fréquence* 800, *la fréquence porteuse étant égale à* 150 *kc/s.*

SOLUTION :

1° $P_p = RI_p^2 = 16 \times 90^2 = 129\,600$ watts.

$$P_m = P_p \left(1 + \frac{M^2}{2}\right).$$

Pour : $M = 0{,}3$ $P_m = 135\,432$ watts;
$M = 0{,}6$ $P_m = 152\,528$ watts;
$M = 1$ $P_m = 194\,400$ watts.

2° La puissance moyenne par période de la fréquence porteuse oscille entre $P_p\,(1-M)^2$ (creux de modulation) et $P_p\,(1+M)^2$ (pointe de modulation), soit entre :

$M = 30\,\%$ 63 504 et 219 024 watts;
$= 60\,\%$ 20 736 et 331 776 watts;
$= 100\,\%$ 0 (amplitude nulle) et $4\,P_p = 518\,400$ watts.

3° La puissance instantanée correspondant aux sommets successifs de la courbe des variations de courant oscille entre

$$2\,P_p\,(1-M)^2 \text{ et } 2\,P_p\,(1+M)^2;$$

pour $M = 100\,\%$ notamment, cette puissance oscille entre 0 et $8\,P_p = 1\,036\,800$ watts.

4° $i = 90\sqrt{2}\,[1 + 0{,}3 \sin(2\pi \times 800\,t)] \sin(2\pi \times 150\,000\,t)$,

où les angles sont exprimés en radians et t en seconde; l'amplitude de i varie entre : $I_1 = 90\sqrt{2}\,(1-0{,}3) = 88{,}83$ ampères en creux de modulation et $I_2 = 90\sqrt{2}\,(1+0{,}3) = 164{,}97$ ampères en pointe de modulation.

CHAPITRE III

RÉGIME LIBRE D'UN CIRCUIT SIMPLE.

Les deux régimes de décharge d'un circuit simple (fig. 1). — En fermant l'interrupteur (1), (2) étant ouvert, on charge C à la tension E correspondant à une énergie électrique $\frac{1}{2}CE^2$; on ouvre (1) et l'on ferme (2) : le condensateur se décharge à travers L et R; deux cas sont à considérer :

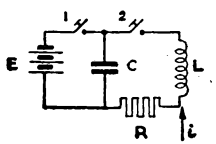


FIG. 1.

1° Si $R < \sqrt{\frac{4L}{C}}$ la décharge est *oscillante amortie*; dans le cas, rencontré en pratique, où R est *très* inférieur à $\sqrt{\frac{4L}{C}}$, le courant i de décharge et la tension u aux bornes de C diffèrent *légèrement* de quantités sinusoïdales par une *lente* diminution de l'amplitude :

a) la *période des oscillations* est donnée par la formule de Thomson :

$$T = 2\pi\sqrt{CL} \quad \left| \begin{array}{l} T \text{ en seconde;} \\ C \text{ en farad;} \\ L \text{ en henry;} \end{array} \right. \qquad [1]$$

correspondant à la pulsation :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL}}; \qquad [2]$$

b) l'amplitude de i et u décroît lentement suivant une loi exponentielle; la *constante de temps* θ du circuit est le temps au bout duquel

l'amplitude de i et u est réduite à une fraction $e^{-1} = \frac{1}{2.72}$ de la valeur initiale :

$$\theta = \frac{2L}{R} \quad \left| \begin{array}{l} \theta \text{ en seconde;} \\ L \text{ en henry;} \\ R \text{ en ohms;} \end{array} \right. \qquad [3]$$

c) i et u sont *pratiquement* en quadrature (ils le seraient *exactement* dans le cas théorique où $R = 0$) : il y a transformation d'énergie élec-

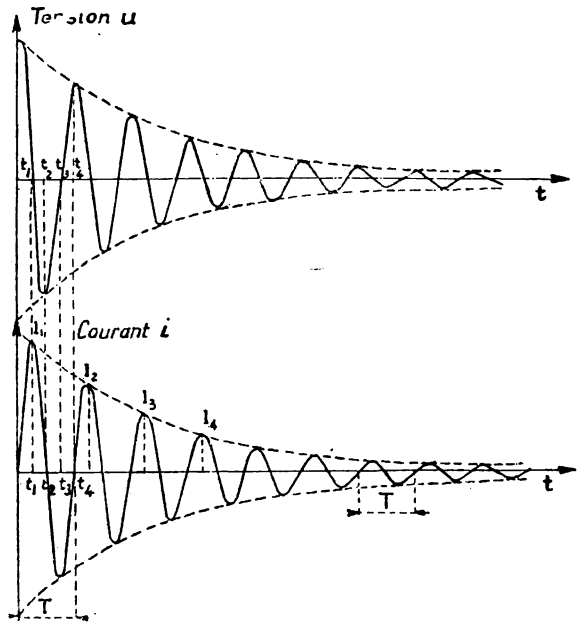


FIG. 2.

trique $\frac{1}{2} Cu^2$ en énergie magnétique $\frac{1}{2} Li^2$ (quand u décroît, tandis que i croît) et réciproquement, l'amortissement étant dû à la lente absorption, sous forme de chaleur dans la résistance, de l'énergie $\frac{1}{2} CE^2$ initialement emmagasinée dans C.

2° Si $R > \sqrt{\frac{4L}{C}}$ la décharge est *apériodique* (fig. 3) : le condensateur se décharge toujours dans le même sens.

Si, C et L étant constants, on fait théoriquement croître R à partir de zéro, on obtient les formes successives données aux courbes 1 à 5 des figures 4, 5 et 6 : quand $R = 0$ (cas théorique), le courant est sinusoïdal;

tant que R est *très* inférieur à $\sqrt{\frac{4L}{C}}$, la période donnée par [1] est constante quand R croît, tandis que l'amortissement augmente; lorsque R, toujours inférieur à $\sqrt{\frac{4L}{C}}$, cesse d'être négligeable par rapport à cette quantité, la décharge est oscillante, mais la période T croît, la valeur exacte de la pulsation étant :

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{CL} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

on passe ensuite en régime apériodique qui, pour le courant, résulte de la conservation d'une seule alternance.

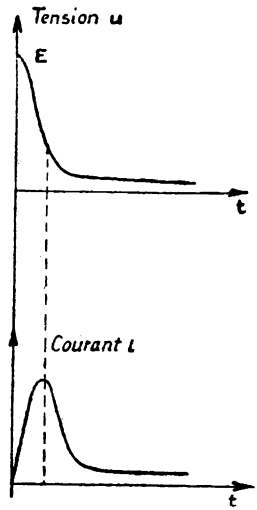


FIG. 3.

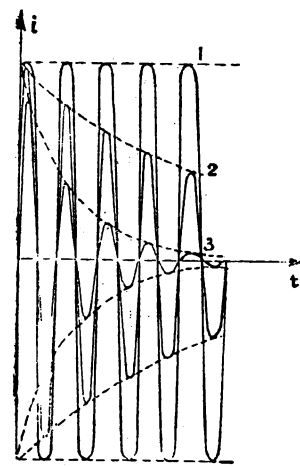


FIG. 4.

Longueur d'onde propre d'un circuit. — Le circuit en régime d'oscillations libres et siège d'un courant de H.F. émet des ondes électromagnétiques qui se propagent, dans l'air et le vide, à une vitesse voisine de 3×10^8 mètres par seconde; à chaque période du courant correspond l'émission d'une onde; il y a donc émission, par seconde, de N ondes qui s'étalent sur la longueur de 3×10^8 mètres; la longueur de chaque onde, ou longueur de l'espace parcouru par les ondes par période T, est donc :

$$\lambda = \frac{V}{N} = VT = 3 \times 10^8 T \quad \left| \begin{array}{l} V = \text{vitesse de propagation des ondes} = 3 \times 10^8 \text{ m/sec.} \\ \lambda = \text{longueur d'onde en mètres;} \\ T \text{ en seconde.} \end{array} \right. \quad [4]$$

En remplaçant T par sa valeur [1] et en adoptant des unités pratiques, on obtient :

$$\lambda = 60\sqrt{CL} \quad \left| \begin{array}{l} \lambda \text{ en mètres;} \\ C \text{ en millièmes de microfarad;} \\ L \text{ en microhenrys.} \end{array} \right. \qquad [5]$$

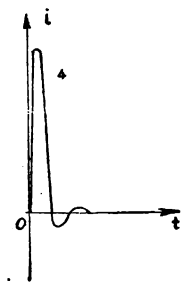


FIG. 5.

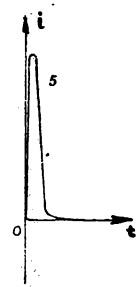


FIG. 6.

Remarque. — Dans toutes ces relations, C et L sont les capacité et self des groupements de condensateurs et de bobines; le calcul est fait conformément aux indications du Chapitre premier.

Cas particuliers de décharge :

1° *Self dans une résistance* (fig. 7) (1). — Décharge apériodique de constante de temps :

$$\theta = \frac{L}{R} \quad \left| \begin{array}{l} \theta \text{ en seconde;} \\ L \text{ en henry;} \\ R \text{ en ohm.} \end{array} \right. \qquad [6]$$

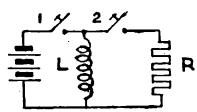


FIG. 7.

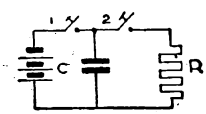


FIG. 8.

2° *Capacité dans une résistance* (fig. 8 et 9). — Décharge apériodique de constante de temps :

$$\theta = CR \quad \left| \begin{array}{l} \theta \text{ en seconde;} \\ C \text{ en farad;} \\ R \text{ en ohm;} \end{array} \right. \qquad [7]$$

(1) On suppose à la figure 7 que (2) est fermé lorsqu'on ouvre 1.

θ est, dans ces deux cas, le temps au bout duquel le courant ou la tension sont réduits à une fraction $\frac{1}{2{,}72}$ de sa valeur initiale.

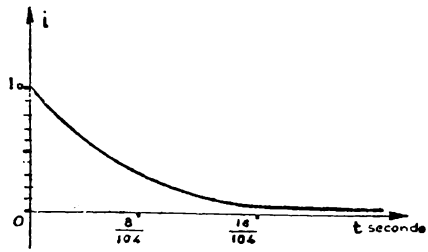


FIG. 9.

APPLICATIONS.

1. ***Circuit d'un récepteur de radiodiffusion à ondes hectométriques.*** — *On considère un circuit aux caractéristiques :*

$$L = 200\ \mu Hs \qquad C = \frac{0{,}5}{1\,000}\ \mu F \qquad R = 5 \text{ ohms}$$

1° *Vérifier que la décharge du circuit est oscillante.*

2° *Calculer la période, la fréquence, la pulsation propre du circuit.*

3° *Valeur de la longueur d'onde propre du circuit ?*

4° *Valeur de la constante de temps θ du circuit; combien de périodes comporte la constante de temps; réduction relative de l'amplitude du courant et de la tension aux instants θ, 2θ, 3θ, etc., à partir du début de la décharge ?*

SOLUTION :

$$1°\ \sqrt{\frac{4L}{C}} = \sqrt{\frac{4 \times 200 \times 10^{-6}}{0{,}5 \times 10^{-9}}} = 1\,240 \text{ ohms} >> 5 \text{ ohms};$$

$$2°\ T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{0{,}5}{10^9} \times \frac{200}{10^6}} \quad \text{soit : } \frac{2}{10^6} \text{ seconde ou 2 microsecondes.}$$

$$N_0 = \frac{1}{T} = 500 \text{ kc/s.} \qquad \omega_0 = 2\pi \times 500\,000.$$

3° Le circuit rayonne 500 000 ondes par seconde qui s'étalent sur 300 000 km dans le vide; chaque onde présente une longueur :

$$\lambda = \frac{300\,000}{500\,000} = 0{,}6 \text{ km soit : } 600 \text{ mètres;}$$

[5] donne directement :

$$\lambda = 60\sqrt{0{,}5 \times 200} = 600 \text{ mètres.}$$

4° $\theta = \dfrac{2 \times 200 \times 10^{-6}}{5}$ seconde, soit : 80 microsecondes;

au bout de 80 microsecondes, soit 40 oscillations, l'amplitude du courant et de la tension sont réduits à une fraction $e^{-1} = \dfrac{1}{2{,}72} = 0{,}37$ de la valeur au début de la décharge; la réduction représente une fraction $e^{-2} = 0{,}12$ et $e^{-3} = 0{,}042$ aux instants 2θ et 3θ.

2. ***Circuit de récepteur à ondes courtes.***

Même application que la précédente avec :

$L = 1{,}2\ \mu H$ $\quad C = 0{,}2\ m\mu F$ $\quad R = 0{,}75$ ohm.

SOLUTION :

1° $T_0 = \dfrac{9{,}8}{10^8}$ $\quad N_0 = 10{,}204\ 1$ M.c./s.;

2° $\lambda = 29{,}4$ mètres;

3° $\theta = 3{,}2$ microsecondes;

θ contient 33 oscillations.

3. ***Calcul de la période de décharge d'un circuit oscillant.***

1° *Calculer la période, la fréquence, la pulsation propres d'un circuit comportant une capacité* C_1 *de* $\dfrac{2}{1\,000}$ *microfarad et une self* L_1 *de* 500 *microhenrys;*

2° *Valeur de l'espace parcouru dans le vide et par période du courant.*

SOLUTION :

1° $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{2}{10^9} \times \dfrac{500}{10^6}} = 6{,}28 \times 10^{-6}$ seconde

$N = \dfrac{1}{T} = 159\,155$ $\quad \omega = 10^6$

2° Espace parcouru dans le temps T pour une vitesse de propagation égale à 3×10^8 mètres par seconde :

$$\lambda = 3 \times 10^8 \times 6{,}28 \times 10^{-6} = 1\,885 \text{ mètres.}$$

Cet espace ou longueur des ondes émises par le circuit (ou longueur d'onde propre du circuit) se calcule directement à partir de [5] :

$$\lambda = 60 \sqrt{2 \times 500} = 1\,885 \text{ mètres.}$$

4. *Circuit oscillant comportant des groupements de condensateurs et de selfs.*

1° *On dispose en parallèle ou en série avec la capacité précédente une capacité* $C_2 = \frac{1}{1\,000}$ *microfarad; calculer les mêmes éléments susmentionnés.*

2° *Même question lorsqu'on dispose en série ou en parallèle avec la self de* 500 *microhenrys, sans induction mutuelle, une deuxième self* L_2 *de* 500 *microhenrys.*

SOLUTION :

1° C_1 et C_2 en parallèle :

$T = 7{,}6 \times 10^{-6}$ $\quad N = 130\,000$ $\quad \lambda = 2\,300$ m

C_1 et C_2 en série :

$T = 3{,}627 \times 10^{-6}$ $\quad N = 275\,700$ $\quad \lambda = 1\,087$ m

2° L_1 et L_2 en série :

$T = 8{,}86 \times 10^{-6}$ $\quad N = 112\,500$ $\quad \lambda = 2\,666$ m

L_1 et L_2 en parallèle :

$T = 4{,}43 \times 10^{-6}$ $\quad N = 225\,000$ $\quad \lambda = 1\,333$ m

5. *Circuit oscillant comportant un variomètre.* — *On constitue un circuit oscillant en associant le variomètre de l'application* (2-I) *à un condensateur fixe de* $\frac{1}{1\,000}$ *de microfarad; limites extrêmes théoriques de la gamme de longueurs d'ondes couverte pour un montage des enroulements en série ou en parallèle lorsqu'on fait varier l'induction mutuelle M; loi des variations de la longueur d'onde propre du circuit en fonction de M.*

SOLUTION :

1° *Selfs en série.* — Les limites extrêmes de la self du variomètre sont 770 et 4 530 microhenrys correspondant à des longueurs d'ondes de 1 662 et 4 038 mètres.

2° *Selfs en parallèle.* — La self maxima du variomètre est égale à $I_2 = 400$ microhenrys et correspond à une longueur d'onde de 1 200 mètres.

Aucune difficulté à étudier les variations de λ en fonction de M pour des bobines L_1 et L_2 successivement en série et en parallèle.

---

6. *Un circuit oscillant comporte une capacité de* $\frac{2}{1\,000}$ *de microfarad; quelle valeur de self faut-il adopter pour que la longueur d'onde propre du circuit soit égale à* 600 *mètres, à* 2 100 *mètres ?*

SOLUTION :

$$600 = 60\sqrt{2 \times L}$$

d'où : $L = 50$ microhenrys

$$L = 612 \text{ microhenrys.}$$

7. ***Circuit oscillant d'émission.*** — *On charge un condensateur de* $\frac{2}{1\,000}$ *de microfarad à un potentiel de* 10 000 *volts et on le décharge dans une self de* 50 *microhenrys; la résistance totale du circuit est égale à* 2 *ohms.*

1° *Calculer la période et la fréquence propres du circuit.*

2° *Calculer la valeur* I_1 *de la première amplitude du courant.*

3° *Calculer la constante de temps et le facteur de surtension du circuit.*

4° *On charge et décharge alternativement* 1 000 *fois par seconde le condensateur; valeur de l'intervalle I entre la fin d'une décharge et le début de la décharge suivante; calculer la puissance P mise en jeu dans le circuit oscillant et l'intensité efficace du courant dans le circuit.*

SOLUTION :

1° $T = \frac{2}{10^6}$ seconde $\qquad N = 500\,000$

$$\lambda = 3 \times 10^8 \times 2 \times 10^{-6} = 600 \text{ mètres}$$

2° Lors du premier maximum du courant, l'énergie magnétique $\frac{1}{2}LI_1^2$ est pratiquement égale à l'énergie électrique initialement emmagasinée dans la capacité; d'où :

$$I_1 = \frac{E}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{E}{L\omega} = \frac{10\,000}{50 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 500\,000} = 63 \text{ ampères.}$$

3° $\theta = \dfrac{1}{2 \times 10^4}$ seconde, soit 50 microsecondes.

Facteur de surtension (voir relation 6-IV) :

$$Q = \frac{\omega\theta}{2} = \frac{2\pi \times 500\,000 \times 1}{2 \times 2 \times 10^4} = 78.$$

4° $$I = \frac{1}{1\,000} - \frac{4{,}6}{10^4} = \frac{5{,}4}{10^4} \text{ seconde.}$$

$$P = 1\,000 \times \frac{1}{2} \times 2 \times 10^{-9} \times 10^8 = 100 \text{ watts;}$$

d'où : $$P = RI^2_{eff}$$

soit : $$I_{eff} = \sqrt{\frac{100}{2}} = 7 \text{ ampères.}$$

8. ***Cas théorique d'un circuit dénué de résistance.*** — *On suppose (cas purement théorique) que la résistance du circuit oscillant est nulle; expressions du courant i et de la tension u en fonction du temps.*

SOLUTION :

Le courant et la tension sont en quadrature :

$$i = 63 \sin \omega t \text{ en ampères,}$$

$$u = 10\,000 \cos \omega t \text{ en volts,}$$

avec : $$\omega = \pi \times 10^6$$

Il n'y a point d'amortissement et l'énergie emmagasinée dans le circuit oscillant conserve sa valeur initiale.

9. ***Décharge d'une capacité dans une résistance.*** — *Valeur de la constante de temps θ d'un circuit* (fig. 8) *de capacité $C = 0{,}2$ mμF et de résistance $R = 4$ mégohms.*

Valeur de la tension u aux bornes de C et du courant i au bout du temps θ (tension initiale de charge $= 2$ mV).

SOLUTION :

$$\theta = \frac{2}{10^{10}} \times 4 \times 10^6 = \text{soit } 800\,\mu\text{ sec.}$$

$$u = 2e^{-1} = 0{,}74 \text{ mV.}$$

$$i = \frac{2}{4 \times 10^6} e^{-1} = 0{,}18 \times 10^{-9} \text{ A.}$$

CHAPITRE IV

RÉSONANCE ET ANTIRÉSONANCE D'UN CIRCUIT SIMPLE.

I. — *Résonance.*

Résonance par réglage de la fréquence de la f.é.m. — On fait varier (fig. 1) la fréquence de la f.é.m. et l'on étudie les variations correspondantes de I et φ respectivement données par les relations [7 et 8-II]; la courbe de résonance des variations de I en fonction de ω (ou de la fréquence) présente l'aspect de la figure 13 : il y a *maximum de courant* lorsque la pulsation présente la valeur ω telle que la réactance totale du circuit soit nulle :

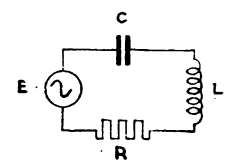


FIG. 1.

$$\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = 0 \qquad [1]$$

soit :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{CL}} = \omega_0; \qquad [2]$$

on dit qu'il y a *résonance entre la source et le circuit et la pulsation* ω *de la f.é.m. est égale, en vertu de* [2], *à la pulsation propre du circuit.*

Propriétés de la résonance; facteur de surtension du circuit. — Lorsque la résonance est établie :

— le courant est : $$I_0 = \frac{E}{R} \qquad [3]$$

— l'angle φ est nul et la puissance livrée par la source est :

$$P = EI_0 \qquad [4]$$

— les différences de potentiel U_C et U_L aux bornes de C et L sont égales :

$$U_C = \frac{I_0}{C\omega_0} = U_L = L\omega_0 I_0 = E \times \frac{1}{CR\omega_0} = E \times \frac{L\omega_0}{R} = E \times Q \qquad [5]$$

les quantités égales $\frac{1}{CR\omega_0}$ et $\frac{L\omega_0}{R}$ qui indiquent combien de fois U_C et U_L sont supérieurs à E s'appellent le *facteur de surtension* Q du circuit.

Il y a entre Q et la constante de temps θ du circuit la relation :

$$Q = \pi \frac{\theta}{T_0} \quad (T_0 = \text{période propre du circuit}). \qquad [6]$$

La figure 2 donne le diagramme des vecteurs à la résonance où I_0 est choisi comme origine des phases : U_L et U_C, en opposition de phase, sont égaux et la tension E se reporte aux bornes de R.

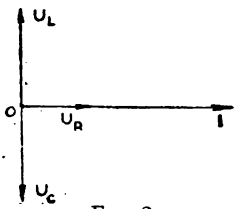


FIG. 2.

Résonance par réglage de la fréquence propre du circuit.

Dans un circuit de réception, la pulsation ω du poste à recevoir est donnée et l'on fait varier la fréquence propre du circuit en agissant sur C ou L jusqu'à réaliser la condition de résonance [2].

Etude de la forme de la courbe de résonance pour de faibles écarts de fréquence de la source autour de la fréquence de résonance.

Désignons par :

I_0 = courant à la résonance;

I = courant pour un écart de fréquence ΔN c/s à partir de la fréquence de résonance N_0 ;

θ = constante de temps du circuit en seconde;

Q = coefficient de surtension du circuit;

U_0 = tension aux bornes de C à la résonance;

U = tension aux bornes de C pour l'écart ΔN;

on a, pour des écarts réduits (20 kc/s par exemple) :

$$y = \frac{I_0}{I} = \frac{U_0}{U} = \sqrt{1 + 4\pi^2\theta^2 (\Delta N)^2} = \sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)^2} ; \quad [7]$$

en adoptant I_0 et U_0 comme valeurs de référence pour le courant et la tension, on préfère souvent caractériser l'acuité de la résonance par la courbe des variations de l'affaiblissement en fonction de ΔN :

$$z = 20 \log \frac{I}{I_0} = 20 \log \frac{U}{U_0} \quad \left| \quad z \text{ en décibels.} \right. \qquad [8]$$

II. — *Antirésonance.*

Antirésonance dans le cas d'un circuit sans résistance (R = 0, cas théorique) (fig. 3). — E, tension commune, étant choisie comme

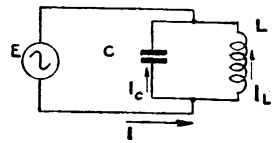


FIG. 3.

origine des phases, le diagramme des vecteurs s'établit comme indiqué à la figure 4.

Les courants dans les trois branches ont pour expressions :

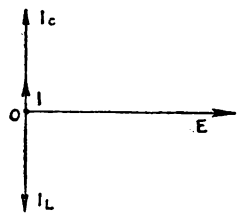


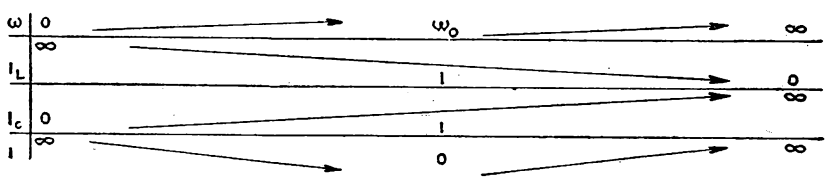
FIG. 4.

$$I_L = \frac{E}{L\omega}$$

$$I_C = \frac{E}{\frac{1}{C\omega}}$$

$$I = E\left(\frac{1}{L\omega} - C\omega\right).$$

1° E — C — L sont fixes; ω croît de zéro à l'infini; d'où le tableau :



Pour la pulsation ω_0, les courants I_C et I_L sont égaux à I_0 (1) tandis que I passe par un minimum nul : le circuit forme *bouchon* pour la pulsation *d'antirésonance* ω_0 égale à la pulsation propre du circuit CL pris isolément; pour les pulsations inférieures à ω_0, le bouchon est « percé » à travers L; il est percé à travers C pour les pulsations supérieures à ω_0.

(1) Erratum : lire, dans les deux tableaux, I_0 au lieu de I pour les valeurs égales de I_C et de I_L obtenues pour $\omega = \omega_0$.

2° Résultats analogues lorsque, E et ω restant fixes, on fait varier soit L soit C: il y a antirésonance lorsque l'on a :

$$\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right) = 0.$$

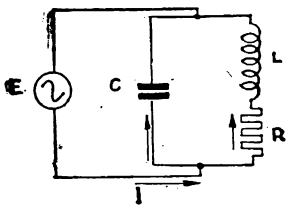
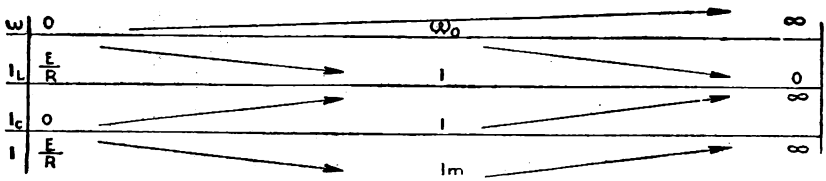


Fig. 5.

Cas réel d'un circuit à faible résistance (fig. 5). — Le diagramme des vecteurs est celui de la figure 6.

1° E-C-L-R fixes; ω croît de zéro à l'infini; sous la condition généralement rencontrée en pratique : $R << L\omega_0$ (soit $Q >> 1$), le tableau donné ci-dessus se transforme comme suit :



$$\text{avec : } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{CL}}.$$

Pour la pulsation ω_0, les courants I_C et I_L sont pratiquement égaux tandis que I passe par un *minimum* I_m; ce minimum n'est pas nul; le circuit bouchon (diagramme des vecteurs de la figure 7) est alors

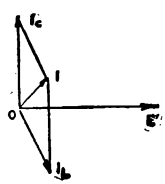


Fig. 6.

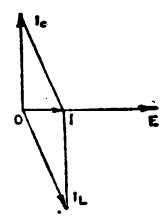


Fig. 7.

équivalent à une *résistance pure* Z_0 vis-à-vis de la source (courant I_m en phase avec E) et l'on a :

$$I_m = \frac{E}{Z_0}$$

avec $$Z_0 = \frac{L^2\omega_0^2}{R} = \frac{L}{CR} = Q\,L\omega_0$$ | Q = facteur de surtension du circuit C,L,R; [9]

$$I_0 = QI_m = \text{courant dans le circuit;} \qquad [10]$$

$$P = EI_m = RI_0^2 = Z_0 I_m^2 \qquad P = \text{puissance livrée par la source.} \qquad [11]$$

Etude de la forme de la courbe d'antirésonance pour de faibles écarts de fréquences autour de la fréquence d'antirésonance. — Lorsque la pulsation ω de la source s'écarte légèrement de ω_0, l'impédance du circuit est approximativement égale à :

$$Z = \frac{L^2 \omega_0^2}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}; \qquad [12]$$

Z varie d'une façon inversement proportionnelle à l'impédance du circuit excité en série et les relations [7] se transforment comme suit :

$$\frac{Z_0}{Z} = \frac{I}{I_m} = \sqrt{1 + 4\pi^2 \theta^2 (\Delta N)^2} = \sqrt{1 + 4Q^2 \left(\frac{\Delta N}{N_0}\right)^2} \qquad [13]$$

(N_0 = fréquence de résonance).

Quelques équivalences utiles en pratique.

1° Le système constitué d'une self L en parallèle avec une forte résis-

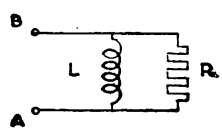


FIG. 8.

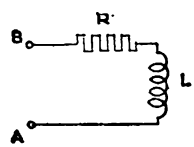


FIG. 9.

tance R ($R >> L\omega$) (fig. 8) est pratiquement équivalent au système de la figure 9, où :

$$R' = \frac{L^2 \omega^2}{R}; \qquad [14]$$

si le système appartient (fig. 10) à un circuit excité sur la pulsation de résonance $\omega_0 = \frac{1}{CL}$, on a :

$$R' = \frac{L}{CR}. \qquad [15]$$

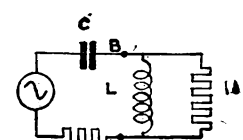


FIG. 10.

2° Réciproquement, le système formé d'une self L en série (fig. 9) avec une faible résistance R' ($R' << L\omega$) est équivalent au système de la figure 8 où :

$$R = \frac{L^2 \omega^2}{R'} \qquad [16]$$

soit, pour la pulsation ω_0 : $R = \frac{L}{CR'}$ [17]

3° Résultats analogues par le système de la figure 11 lorsque : $R >> \frac{1}{C\omega}$; on a :

$$R' = \frac{1}{C^2 R^2 \omega^2} \quad [18]$$

et, pour la pulsation ω_0 : $R' = \frac{L}{CR}$; [19]

de même, le système formé d'une faible résistance R′ (fig. 12) en série

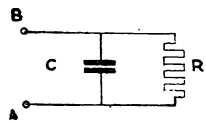


FIG. 11.

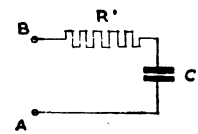


FIG. 12.

avec $C\left(R' << \frac{1}{C\omega}\right)$ est équivalent au système de la figure 11 avec :

$$R = \frac{1}{C^2 \omega^2 R'} \quad [20]$$

soit, par la pulsation ω_0 : $R = \frac{L}{CR'}$. [21]

APPLICATIONS.

1. ***Résonance série.*** — *On insère dans le circuit spécifié à l'application N° 1-III une f.é.m. de valeur* $E = 100\,\mu V$. :

1° *Quelle doit être la fréquence* N_0 *de la f.é.m. pour réaliser la résonance ?*

2. *Valeurs à la résonance du courant, des tensions aux bornes de la self* U_L, *de la capacité* U_C *et de la résistance* U_R; *valeur du facteur de surtension et de la puissance livrée par la source ?*

3° *Tracer la courbe de sélectivité du circuit.*

SOLUTION :

1° $N_0 = 500$ kc/s.

2° $I_0 = \frac{100}{5} = 20\,\mu A.$

$$U_L = U_C = 200 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 500.000 \times 20 = 12.560\,\mu V.$$

$$U_R = 100\,\mu V. \qquad Q = \frac{628}{5} = 125{,}6.$$

$$P = 100 \times 20 = 2\,000\,\mu\mu W.$$

3° On peut adopter l'une ou l'autre des formules [7]; la deuxième donne :

$$y = \sqrt{1 + 4\,(125{,}6)^2 \left(\frac{\Delta N}{500.000}\right)^2} \quad (\Delta N \text{ en c/s})$$

et le tableau :

ΔN en kc/s	0	1	2	3	4	5	10
y	1	1,12	1,42	1,8	2,24	2,7	5,14
$\frac{I}{I_0}$	1	0,89	0,7	0,55	0,45	0,37	0,19
z en db (environ)	0	1	3	5	7	9	14

2. ***Résonance série.*** — *Même application que la précédente si l'on intercale une f.é.m de 500 microvolts de fréquence variable dans le circuit de caractéristiques :* $C = 0{,}2$ *m.μ.F.*

$$L = 222\,\mu H.s. \qquad R = 5 \text{ ohms}.$$

4° *Accroissement apparent de la résistance du circuit si l'on branche aux bornes de la self ou de la capacité une résistance* R_1 *de* 10^5 *ou de* 10^6 *ohms (fig. 10) ?*

SOLUTION :

1° $N_0 = 750\,000.$

2° $I_0 = 86\,\mu A. \qquad U_C = U_L = 1\,045 \times 86 = 89\,870\,\mu V.$

$$Q = 180 = \frac{\pi}{\theta} = \frac{3{,}14}{0{,}0173} \quad (\theta = \text{Cte de temps}).$$

$$U_R = 500\,\mu V. \qquad P = EI = 43\,000\,\mu\mu W.$$

3° La première relation [7] donne :

$$\frac{1}{y} = \sqrt{1 + \frac{237\,170}{10^{12}} (\Delta N)^2} \qquad \text{avec : } \theta = \frac{77}{10^6} \text{ seconde}$$

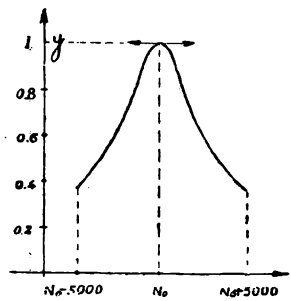


FIG. 13.

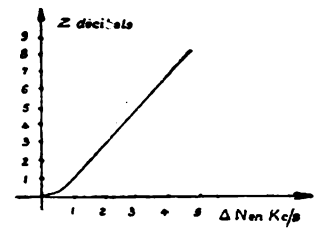


FIG. 14.

d'où le tableau :

ΔN en kc/s	0	1	2	3	4	5	
$y = \frac{I}{I_0}$	1	0,9	0,7	0,58	0,45	0,35	(fig. 13)
z en db (environ)	0	1	3	5	7	9	(fig. 14)

4° Il s'agit d'une résistance $R_1 >> L\omega$

d'où l'accroissement apparent [formule 15] :

$$\frac{222 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-10} \times 10^5} = 11{,}1 \text{ ohms} \quad \text{pour : } R_1 = 10^5 \text{ ohms}$$

et 1,1 ohm pour $R_1 = 10^6$ ohms.

Le facteur de surtension est réduit dans le rapport inverse des résistances et devient :

— dans le premier cas : $\frac{5{,}5}{11{,}1 + 5{,}5} \times 180 = 56$;

— dans le deuxième cas ; 148.

3. ***Influence de la constante de temps θ sur la forme de la courbe de résonance.*** — *Déterminer les courbes de l'affaiblissement z du courant en fonction de l'écart* Δ N *exprimé en p. s. pour les diverses*

valeurs suivantes de la constante de temps θ *du circuit :* 10-20-30-50-100-200-300 *et* 1 000 *microsecondes.*

SOLUTION : Voir la figure 15.

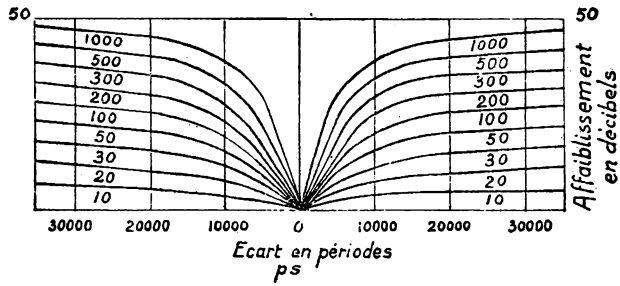


FIG. 15.

QUESTION DE COURS. — *Schéma de principe d'un amplificateur à résonance à un étage. Explication du fonctionnement. Valeur du gain. Avantages et inconvénients des amplificateurs à résonance.*

Nota. — *La rédaction de la question de cours ne devra pas excéder deux pages.*

4. ***Résonance série.*** — *Un circuit oscillant comporte un condensateur de capacité C dont on néglige la résistance et une bobine de self L de résistance R. Un couple thermoélectrique T, dont la résistance est* 0,4 *ohm, est inséré dans le circuit et permet de mesurer l'intensité efficace du courant qui circule dans ce dernier. Un oscillateur, très lâchement couplé à ce circuit, induit dans la bobine L une f.é.m de pulsation* ω.

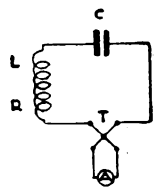


FIG. 16.

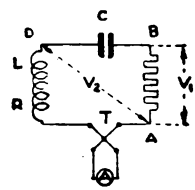


FIG. 17.

1° *On amène tout d'abord la pulsation de l'oscillateur à être égale à la pulsation propre du circuit oscillant. Dans une première expérience (fig.* 16) *l'intensité efficace du courant induit dans ce dernier est* $I_1 =$ 0,400 *ampère; dans une deuxième expérience (fig.* 17), *on intercale*

dans le circuit oscillant une résistance de 40 ohms dépourvue de self-induction. Toutes les autres conditions de la première expérience restant inchangées, le courant induit a pour valeur : $I_2 = 0{,}080$ *ampère. Déduire de ces données la valeur de la résistance R de la bobine.*

2° *La pulsation de l'oscillateur, toujours égale à la pulsation propre du circuit oscillant, a pour valeur* 10^6. *Conservant le schéma de la figure* 17 *et les conditions de la deuxième expérience, on mesure d'une part la différence de potentiel efficace* V_1 *entre A et B (aux bornes de la résistance* r), *d'autre part, la différence de potentiel* V_2 *entre A et D (aux bornes du système formé par la résistance* r *et la capacité C placés en série) ;*

on constate que : $V_2 = 5{,}1\, V_1$;

calculer les valeurs de V_1, V_2, *C et L.*

3° *Sans modifier en quoi que ce soit les caractéristiques du circuit représenté par la figure* 17, *ni ses conditions de couplage à l'oscillateur, on augmente la pulsation de ce dernier pour l'amener à la valeur* 1 003 000. *Calculer la nouvelle valeur* I_2' *de l'intensité efficace du courant induit ; que peut-on dire de la comparaison des deux intensités* I_2 *et* I_2' ?

Paris, avril 1938.

SOLUTION :

1° I étant l'intensité dans le circuit de l'oscillateur couplé à L, la f.é.m. E induite dans L conserve la même valeur MωI dans l'une et l'autre expérience; la résonance étant réalisée, on a :

$$E = (R + 0{,}4)I_1 = (R + 0{,}4 + r)I_2$$

où 0,4 représente la résistance du couple; on en déduit :

$$R = r\frac{I_2}{I_1 - I_2} - 0{,}4 = 9{,}6 \text{ ohms.}$$

2° On a :

$$V_1 = rI_2$$

$$V_2 = \sqrt{r^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}\, I_2$$

d'où la relation :

$$\sqrt{r^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}\, I_2 = 5{,}1\, rI_2$$

soit en élevant au carré les deux membres :

$$r^2 + \frac{1}{C^2\omega^2} = 5{,}1^2\, r^2$$

ou très approximativement :

$$\frac{1}{C^2\omega^2} = 25\ r^2$$

et $$C = \frac{1}{200 \times 10^6}$$ soit $\frac{5}{1\,000}$ de microfarad;

de plus : $$L\omega = \frac{1}{C\omega} = 200$$

$$\text{et } L = \frac{200}{10^6} \text{ ou } 200 \text{ microhenrys.}$$

$V_1 = 40 \times 0{,}08 = 3{,}2$ volts.

$V_2 = 5{,}1 \times 3{,}2 = 16{,}32$ volts.

3° On a : $$I_2' = \frac{I_2}{\sqrt{1 + \theta^2 (\Delta\omega)^2}}$$

où : $\theta = \dfrac{2L}{R + 0{,}4 + r} = \dfrac{8}{10^6}$ seconde et $\Delta\omega = 3\,000$.

Le calcul montre que I_2' diffère très peu de I_2 : le circuit comporte un amortissement suffisamment élevé pour que la chute de courant soit inappréciable lorsque la pulsation s'écarte de 3 000 autour de la pulsation de résonance.

5. ***Résonance série.*** — *Dans un circuit comprenant* (fig. 18) *une self L fixe et un condensateur variable C on induit une f.é.m. sinusoïdale correspondant à une longueur d'onde de* 1 000 *mètres. Soit U la différence de potentiel aux bornes du condensateur.*

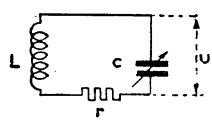


FIG. 18.

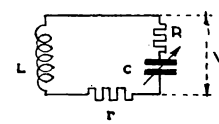


FIG. 19.

1° *Soit C la valeur de la capacité qui rend U maximum; on demande de calculer L. Application :* $C = 0{,}5/1\,000$ *microfarad.*

2° *On intercale* (fig. 19) *dans le circuit une résistance R sans self. On*

constate que V, différence de potentiel entre A et M, est égal à quatre fois la différence de potentiel aux bornes de R. Calculer R.

3° *On constate que le coefficient de surtension Q du circuit de la figure* 19 *est égal à* 1. *Calculer la résistance propre r du circuit.*

Saint-Malo, 1932.

SOLUTION :

1° $L = 555$ microhenrys.

2° Différence de potentiel entre A et $M = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}} \times I = 4RI$

d'où :

$$R = \frac{1}{\sqrt{15}} \times \frac{1}{C\omega} = 274 \text{ ohms.}$$

3° On a :

$$Q = 1 = \frac{1}{C(R + r)\,\omega} = \frac{1}{0{,}5 \times 10^{-9}\,(274 + r) \times 2\pi \times 300\,000}$$

d'où : $r = 787$ ohms.

6. ***Circuit bouchon sans résistance.*** — *Un circuit monté en bouchon et accordé sur* 400 *mètres comporte une self L de* 222 *microhenrys et une capacité C* (fig. 3).

1° *Valeur de C ?*

2° *On fait varier la fréquence N de la f.é.m. E; étudier en fonction de N les lois des variations des courants dans les trois branches; pour quelle fréquence les courants dans L et C sont-ils égaux ? On a : E* = 100 *microvolts.*

SOLUTION :

1° $400 = 60\sqrt{C \times 222}$

d'où : $C = \frac{0{,}2}{1\,000}$ microfarad.

2° On a : $I_C = CE\omega = \frac{0{,}2}{10^9} \times 100 \times \omega = \frac{2}{10^8} \times \omega$ microampères.

$$I_L = \frac{E}{L\omega} = \frac{100}{\frac{222}{10^6} \times \omega} = \frac{222\,\omega}{10^7} \text{ microampères.}$$

et : $I = |I_C - I_L| = \left| \frac{2}{10^8}\,\omega - \frac{10^7}{222\,\omega} \right|$ microampères.

d'où le tableau suivant :

N	0		750.000		∞
I_C	0		0,01 μA		∞
I_L	∞		0,01 μA		0
I	∞		0		∞

On obtient (fig. 20) :

— suivant une droite OI_C la loi des variations du courant I_C en fonction de N;

— suivant un arc d'hyperbole AB la loi des variations de I_L en fonction de N (les valeurs positives des courants correspondent à une avance de $\frac{\pi}{2}$ sur la tension, les valeurs négatives à un retard de $\frac{\pi}{2}$);

— suivant deux arcs CD et DE la loi des variations de I en fonction de N.

Pour la fréquence de résonance $N_0 = 750\,000$, le courant I est nul tandis que les deux courants I_C et I_L sont égaux.

7. ***Circuit bouchon avec résistance*** (fig. 5). — *En fait, la bobine de l'application précédente comporte une résistance de* 5 *ohms.*

1° *Valeur de la fréquence d'antirésonance ?*

2° *Valeur, pour la fréquence d'antirésonance :*

— *du courant dans la branche principale;*

— *des courants I_L et I_C;*

— *de la puissance livrée au circuit ?*

Tracer le diagramme des vecteurs.

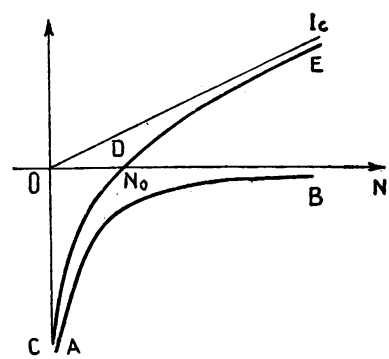


FIG. 20.

3° *Accroissement apparent de la résistance de la bobine et diminution apparente de la résistance équivalente au circuit bouchon si l'on dispose aux bornes de la bobine une résistance R_1 de 10^5 ou de 10^6 ohms ?*

SOLUTION :

1° R étant très inférieur à $L\omega$, la fréquence d'antirésonance est pratiquement la même que dans l'application précédente.

2° A l'antirésonance, le circuit est équivalent à une résistance pure :

$$\frac{L}{CR} = \frac{222 \times 10^{-6}}{0{,}2 \times 10^{-9} \times 5} = 222\,000 \text{ ohms};$$

d'où le courant principal :

$$I = \frac{100}{222\,000} = 0{,}000\,45 \text{ microampère};$$

les courants I_C et I_L sont pratiquement les mêmes qu'en l'absence de résistance, soit 0,01 microampère.

La puissance livrée au circuit s'exprime de différentes façons :

$$P = EI = 100 \times 0{,}000\,45 = \frac{45}{1\,000} \text{ micromicrowatt};$$

$$= \frac{L}{CR} I^2 = 222\,000 \times \left(\frac{0{,}000\,45}{10^6}\right)^2$$

$$= RI_L^2 = 5 \times \left(\frac{0{,}01}{10^6}\right)^2.$$

3° Comme $R_1 >> L\omega$, l'accroissement apparent de la résistance de la bobine est :

$$\frac{L}{CR_1} = \frac{222 \times 10^{-6}}{0{,}2 \times 10^{-9} \times 10^5} = 11{,}1 \text{ ohms};$$

pour $R_1 = 10^6$ ohms, l'accroissement est de 1,11 ohm;

le circuit bouchon est alors équivalent à l'antirésonance à une résistance :

$$\frac{L}{C(R + R_1)} = \frac{222 \times 10^{-6}}{0{,}2 \times 10^{-9} \times (5 + 11{,}1)} = 69\,000 \text{ ohms}$$

pour $R_1 = 10^5$ ohms;

et 182 000 ohms pour : $R_1 = 10^6$ ohms.

8. ***Circuit bouchon avec résistance.*** — *On monte en circuit bouchon le circuit des applications* (1-III) *et* (1-IV) :

1° *Valeur de la fréquence* N_0 *d'antirésonance et de la résistance correspondante* Z_0 *du circuit ?*

2° *Valeurs des courants dans les trois branches pour une différence de potentiel aux bornes* $E = 100$ *microvolts ?*

3° *Tracer la courbe des variations du rapport* $\frac{Z}{Z_0}$ *en fonction de l'écart de fréquence* ΔN *où* Z_0 *et* Z *représentent respectivement l'impédance équivalente au circuit à l'antirésonance et pour l'écart de fréquence* ΔN.

SOLUTION :

$$N_0 = 500 \text{ kc/s.}$$

$$Z_0 = QL\omega_0 = 125{,}6 \times 2\pi \times 200 \times 10^{-6} \times 500\,000 = 78\,877 \text{ ohms.}$$

2° $$I_0 = \frac{100}{78\,877} \text{ µA.} = 0{,}001\,3 \text{ µA.}$$

$$I_L = I_C = QI_0 = 125{,}6 \times 0{,}001\,3 = 0{,}16 \text{ µA.}$$

3° La courbe de $\frac{Z}{Z_0}$ est la même que celle des variations en fonction de ΔN du rapport $\frac{I}{I_0}$ pour le circuit excité en série (I_0 = courant à la résonance, I = courant pour l'écart ΔN); le 3° de l'application N° 1 donne les éléments de la réponse.

9. ***Le circuit bouchon.*** — *Les éléments d'un circuit oscillant sont les suivants :*

résistance : 6 ohms;
self : 200 µ.H.s.
capacité : $\frac{1}{18}$ *m.µ.F.*

Ce circuit est embroché à la manière d'un circuit bouchon aux bornes d'une source H.F. dont la f.é.m. est de 12 volts et dont la fréquence est égale à la fréquence propre du circuit (fig. 3).

1° *Calculer la valeur de cette fréquence* N_0 *et la longueur d'onde* λ *correspondante.*

2° *Calculer la valeur du courant I débité par la source, du courant* I_C *qui traverse la capacité, et du courant* I_L *qui traverse l'ensemble de la self et de la résistance. Montrer sur un graphique simple les relations de phase entre les courants.*

3° *Calculer la constante de temps* θ *du circuit, et dire combien d'oscillations n il peut effectuer pendant ce temps* θ.

On admettra que : $\pi = 3{,}14$ *et que* $\pi^2 = 10$.

QUESTION DE COURS :

a) *Amplification en haute fréquence : décrire le montage symétrique et citer ses avantages.*

b) *Qu'est-ce que l'amplification en classe B ?*

c) *Comment réalise-t-on une multiplication de fréquence; quel est le but de cette opération ?*

Nantes, juin 1946.

SOLUTION :

1° $N_0 = 1\,500$ kc/s $\quad \lambda = 200$ mètres;

2° $L\omega_0 = 600\ \pi$ ohms $\quad Q = 314$;

d'où [relation 9] : $Z_0 = QL\omega_0$ soit : 591.600 ohms.

$$I_m = \frac{12}{5{,}91 \times 10^5} \text{ A, soit } 20\ \mu\text{A.}$$

$$I_C = I_L = QI = 6{,}28 \text{ m.A.}$$

Graphique exact à la figure 7, très voisin de celui de la figure 4.

3° $\theta = 66{,}7$ microsecondes;

$$n = \frac{\theta}{T_0} = \theta N_0 \text{ soit } 100 \text{ oscillations environ.}$$

QUESTION DE COURS. — *Lampes diodes : courbes caractéristiques; applications avec schéma-type et conditions à remplir par les éléments.*

10. PROBLÈME. ***Résonance série.*** — *Schéma d'essai* (fig. 21 *a*) *où :*

G = générateur H.F. à fréquence N réglable et connue, à f.é.m. E indépendante de N et de résistance interne négligeable;

C = capacité étalonnée sans pertes;

V = voltmètre H.F. d'impédance infinie.

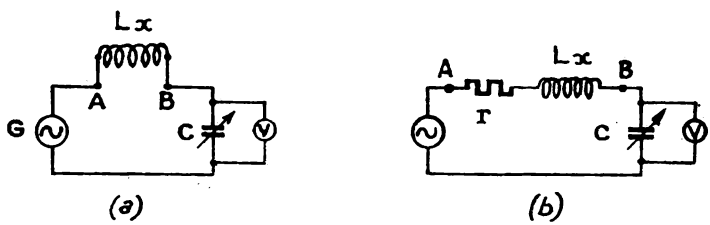


FIG. 21.

1° *Valeur de la self L d'une bobine de résistance x placée entre A et B lorsque, C étant ajusté au maximum V_1 de V, on note :*

$$N = 10\ Mc/s, \qquad C = 320\ pF, \qquad V_1 = 12{,}5\ V.$$

2° *L'insertion* (fig. 21 *b*) *d'une résistance* $r = 0{,}2\ \Omega$ *diminue* V *à la valeur* $V_2 = 7{,}5\ V$; *valeurs de* x *et* E ?

3° r *étant supprimé, on fait varier* N *jusqu'à atteindre une déviation :*

$$V_3 = \frac{V_1}{\sqrt{2}}$$

Valeur de l'écart de fréquence ΔN *correspondant ?*

Paris, 1954.

SOLUTION :

1° $L = 0{,}82\ \mu H$.

2° On a :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{x}{r + x} \qquad \text{et} \qquad x = 0{,}3\ \Omega.$$

3° L'écart ΔN se déduit de [7] où :

$$Q = \frac{L\omega}{x} = 172 \qquad \text{et :} \qquad \frac{U_0}{U} = \frac{V_1}{V_3} = \sqrt{2}\ \text{(affaiblissement 3 db)};$$

d'où :

$$\Delta N = \frac{N}{2\,Q} = \frac{10^7}{2 \times 172} \text{ soit : } 29{,}07 \text{ kc/s.}$$

CHAPITRE V

CIRCUITS COUPLÉS.

Définition; coefficient de couplage m.

1° Une source à f.é.m. sinusoïdale débite sur un circuit *primaire* un courant qui induit une f.é.m. dans un circuit secondaire par l'intermédiaire d'un organe commun (self ou capacité) ou d'une induction mutuelle.

2° *couplage magnétique.* — a) *par induction mutuelle* (fig. 1) :

$$m = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \qquad [1]$$

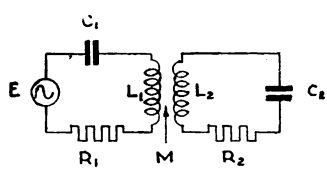


FIG. 1.

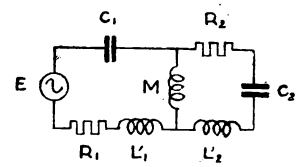


FIG. 2.

b) *par self commune M* (fig. 2). Même définition [1] de m avec :

$$L_1 = (L'_1 + M) \qquad L_2 = (L'_2 + M)$$

c) *par autotransformateur* (fig. 3). Même définition [1] de m avec :

$$L_1 = (L'_1 + L''_1) \qquad L_2 = (L'_2 + L''_2)$$

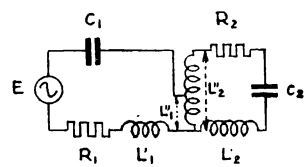


FIG. 3.

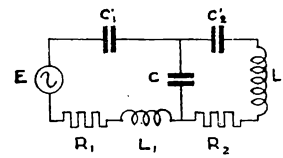


FIG. 4.

3° *Couplage électrique* (fig. 4). Valeurs des capacités primaire et secondaire :

$$C_1 = \frac{CC'_1}{C + C'_1} \qquad C_2 = \frac{CC'_2}{C + C'_2} \qquad m = \frac{\sqrt{C_1 C_2}}{C} = \sqrt{\frac{C'_1 C'_2}{(C + C'_1)(C + C'_2)}}$$

$m = 0$ lorsque C est infini (fig. 5); $m = 100\ \%$ lorsque $C = 0$ (fig. 6).

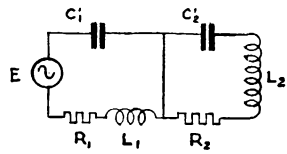


FIG. 5.

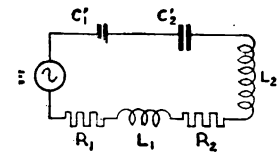


FIG. 6.

Couplage lâche. — Le couplage est dit lâche lorsque la réaction du secondaire sur le primaire est négligeable. Le courant primaire I_1 (fig. 1) se calcule comme si le secondaire n'existait point; d'où la f.é.m. E_2 et le courant I_2 dans le secondaire :

$$E_2 = M\omega I_1 \qquad [2]$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + \left(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega}\right)^2}}; \qquad [3]$$

le couplage est lâche si la f.é.m. $M\omega I_2$ de réaction du secondaire sur le primaire est très inférieure à E.

Régime libre de deux circuits de même période propre et de faible résistance; ondes de couplage (fig. 7). — R_1 et R_2 sont faibles; on suppose, d'autre part :

$$T_1 = 2\pi\sqrt{C_1L_1} = T_2 = 2\pi\sqrt{C_2L_2} = T \qquad [4]$$

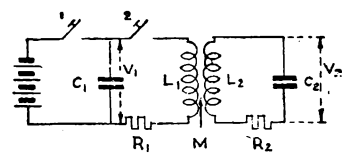


FIG. 7.

L'interrupteur (2) étant ouvert, on charge C_1 en agissant sur (1); on ouvre (1), on ferme (2); la figure 8 donne les variations des tensions v_1 et v_2 aux bornes de C_1 et C_2 (les formes des courants i_1 et i_2 sont analogues); les courants i_1 et i_2 peuvent être individuellement considérés comme étant la somme de deux courants amortis de périodes respectives :

$$\begin{cases} T' = T\sqrt{1+m} \\ T'' = T\sqrt{1-m} \end{cases} \qquad [5]$$

il se produit un phénomène de battements caractérisé par une suite périodique de renforcements et d'extinctions des courants i_1 et i_2, le temps entre deux maxima ou deux minima étant égal à $\frac{1}{(N''-N')}$.

Influence sur un primaire d'un secondaire accordé sur la fréquence de la source; les propriétés de transmission d'un

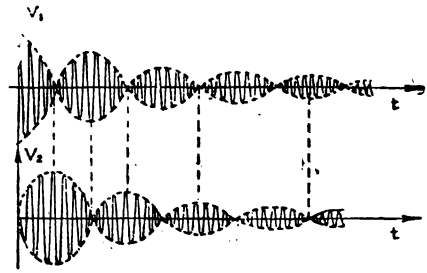


FIG. 8.

système de deux circuits couplés individuellement accordés sur une même pulsation ω_0.

1° Un circuit secondaire accordé sur la pulsation ω_0 de la source introduit dans le primaire avec lequel il est couplé une résistance apparente :

$$R_c = \frac{M^2\omega^2_0}{R_2} \qquad [6]$$

Si le primaire est également accordé sur ω_0, on obtient les expressions des courants primaires I_1 et secondaire I_2, des puissances $R_1I_1^2$ et $R_2I_2^2$ fournies au primaire et au secondaire, ainsi que du rendement secondaire ou rapport de la puissance P_2 transmise au secondaire à la puissance totale fournie par la source :

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + \dfrac{M^2\omega^2_0}{R_2}} \qquad [7]$$

$$I_2 = \frac{M\omega_0 I_1}{R_2} = \frac{E}{M\omega_0 + \dfrac{R_1R_2}{M\omega_0}} \qquad [8]$$

$$\eta = \frac{R_2I_2^2}{R_1I_1^2 + R_2I_2^2} = \frac{1}{1 + \dfrac{R_1R_2}{M^2\omega_0^2}}. \qquad [9]$$

2° La pulsation de la source restant égale à ω_0, on fait croître M et l'on étudie les variations correspondantes des courants I_1 et I_2, de P_2 et η : le courant I_1 (fig. 9), évidemment égal à $\dfrac{E}{R_1}$ quand $M = 0$, décroît ensuite progressivement quand M croît (relation [7]); l'expression [8]

montre que le courant secondaire croît d'abord avec M pour atteindre un maximum pour un couplage critique M_C et décroître ensuite (fig. 10); la valeur de M_C est telle que :

$$M_C^2\omega_0^2 = R_1R_2; \qquad [10]$$

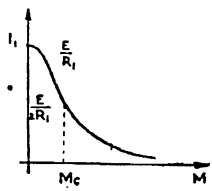


FIG. 9.

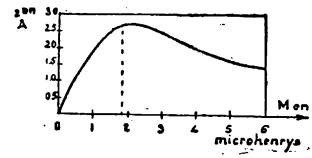


FIG. 10.

pour cette valeur, les courants I_1 et I_2 sont :

$$I_{1C} = \frac{E}{2R_1} \qquad [11]$$

$$I_{2\,max} = \frac{E}{2\sqrt{R_1R_2}}; \qquad [12]$$

enfin, le rendement η croît progressivement avec M pour atteindre le taux de 50 % pour le couplage critique et croître ensuite jusqu'à un maximum :

$$\eta_M = \frac{1}{1 + \dfrac{R_1R_2}{L_1L_2\omega_0^2}} \qquad [13]$$

très voisin de 1, si l'on tient compte du fait que, en pratique, les quantités R_1 et R_2 sont respectivement très faibles en regard de $L_1\omega_0$ et $L_2\omega_0$.

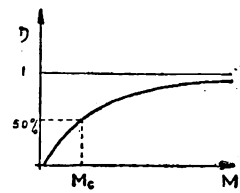


FIG. 11.

Les figures 9, 10 et 11 donnent les variations de I_1, I_2 et η en fonction de M.

3° Pour chaque valeur de M on trace la courbe des variations du rapport :

$$y = \frac{I_2}{I_{2\,max}}$$

lorsqu'on fait varier la pulsation ω autour de ω_0, I_{2max} étant la valeur du courant secondaire pour la pulsation d'accord ω_0 de la source et I_2 la valeur du même courant pour la pulsation ω; la forme de cette courbe caractérise l'acuité de la résonance secondaire pour l'induction mutuelle M considérée. La forme de la courbe de résonance secondaire se modifie

lorsque M croît (fig. 12) : aiguë lorsque M est faible (courbe 3), elle s'aplatit au sommet lorsque M croît (courbe 2); lorsque M dépasse le

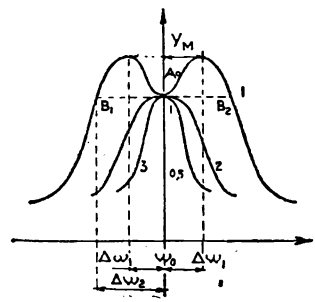


FIG. 12.

couplage critique, elle se modifie suivant les indications de la courbe I et l'ensemble des deux circuits forme *filtre de bande.*

APPLICATIONS.

1. ***Circuits identiques en couplage magnétique lâche.*** — *On donne* (fig. 1) *deux circuits identiques de caractéristiques :*

$$L_1 = L_2 = L = 166 \text{ microhenrys; } C_1 = C_2 = C = \frac{0{,}15}{1\,000} \text{ microfarad;}$$

les deux circuits ont un coefficient de surtension égal à 100 *et présentent un coefficient de couplage* $m = 0{,}001$; *le primaire est le siège d'une f.é.m. sinusoïdale* $E = 100$ *volts.*

1° *Valeur de l'induction mutuelle entre les deux circuits ?*

2° *Pour quelle fréquence* N_0 *les courants primaire et secondaire sont-ils maxima ? Valeur de la résistance des circuits; valeurs des courants et des puissances primaire et secondaire; valeur du rendement secondaire ?*

SOLUTION :

1° $M = 0{,}001 \times 170 = 0{,}17$ microhenry;

2° $N_0 = 10^6$

$$\frac{L\omega_0}{R} = \frac{166 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6}{R} = 100 \text{ d'où : } R = 10{,}42 \text{ ohms}$$

$$I_{1\,max} = \frac{E}{R} = \frac{100}{10{,}42} = 9{,}60 \text{ ampères}$$

$$E_2 = 0{,}17 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6 \times 9{,}60 = 10{,}25 \text{ volts}$$

$$I_{2max} = \frac{E_2}{R} = \frac{10{,}25}{10{,}42} = 0{,}98 \text{ ampère}$$

$$P_1 = EI_{1\,max} = 100 \times 9{,}6 = 960 \text{ watts}$$

$$P_2 = E_2 I_{2max} = 10{,}25 \times 0{,}98 = 10 \text{ watts}$$

$$\eta = \frac{10}{960 + 10} = 1\ \%.$$

La f.é.m. : $E_1 = M\omega I_2 = 0{,}93$ volt est négligeable vis-à-vis de E : le couplage est bien lâche.

2. ***Circuits de même période propre en couplage quelconque accordés sur la fréquence de la source.*** — *On donne* (fig. 1) *deux circuits de caractéristiques :*

$C_1 = 1$ m.μ.F. $\quad L_1 = 100$ μ.H.s. $\quad R_1 = 3$ *ohms.*

$C_2 = 0{,}5$ m.μ.F. $\quad L_2 = 200$ μ.H.s. $\quad R_2 = 5$ *ohms.*

(*fréquence propre de chaque circuit considéré isolément* = 500 *kc/s*).

Une f.é.m. de 100 *volts de fréquence* 500 *kc/s débite sur le primaire :*

1° Couplage lâche. — *On donne* $M = 0{,}1$ μ.*H.; calculer l'accroissement apparent* R_C *de la résistance primaire dû à l'effet du secondaire; le couplage est-il lâche ? Calculer les courants et puissances primaires et secondaires.*

2° *Même question avec* $M = 1$ *microhenry.*

3° *Déterminer l'induction mutuelle critique et les valeurs correspondantes des courants et puissances primaires et secondaires.*

SOLUTION :

1° $R_C = \dfrac{(0{,}1 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 500\,000)^2}{5}$

$= 0{,}019$ ohm; comme $R_C << R_1$, le couplage est lâche : l'influence du secondaire est en effet négligeable; on a :

$$I_1 = \frac{100}{3} = 33{,}3 \text{ A.}$$

$$I_2 = \frac{0{,}1 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 500\,000 \times 33{,}3}{5} = 2{,}1 \text{ A.}$$

$P_1 = 3 \times 33{,}3^2 = 3\,333$ W. $\qquad P_2 = 5 \times 2{,}1^2 = 22$ W. $(P_2 << P_1)$

2° $R_C = 1{,}9$ ohm n'est plus négligeable vis-à-vis de R_1 : le couplage n'est plus lâche; on a [relations 7-8 et 9] :

$$I_1 = 20{,}1 \text{ A} \qquad I_2 = 12{,}62 \text{ A.}$$

$$P_1 = 1\,212 \text{ W.} \qquad P_2 = 800 \text{ W.} \qquad \eta = 40\ \%.$$

3° Pour l'induction mutuelle critique, on a :

$$\frac{M_C^2 (2\pi \times 500\,000)^2}{5} = 3 \qquad M_C = 1{,}23 \text{ µH.}$$

A noter la faible valeur de M_C; on a, d'autre part [relations 11 et 12] :

$$I_{1C} = 16{,}6 \text{ A} \qquad I_{2MAX} = 13 \text{ A} \qquad P_{1C} = P_{2C} = 833 \text{ W.} \qquad \eta_C = 50\ \%$$

3. ***Circuits couplés.*** — *On considère* (fig. 13) *un circuit oscillant couplé avec une antenne, accordée sur la même fréquence et dont les caractéristiques sont les suivantes :*

Self primaire $L_1 = 10$ *mH.;*
Self de couplage de l'antenne $L_2 = 0{,}4$ *mH.;*
Résistance globale de l'antenne : $R_2 = 50$ *ohms;*
Coefficient de couplage entre L_1 *et* L_2 *:* $m = 0{,}1$;
Surtension du circuit primaire: $Q_1 = 100$;
Fréquence d'accord : $N_0 = 31\,500$ *c/s.*

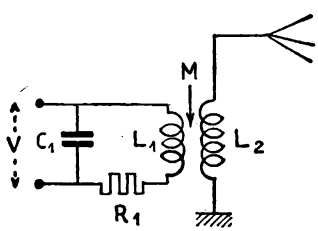


FIG. 13.

On applique aux bornes du circuit oscillant une tension H.F. V de 10 000 *volts efficaces de fréquence égale à* 31 500 *c/s.*

On demande :

1° *Quelle est la valeur de la capacité* C_1 *du circuit oscillant ?*

2° *Valeurs : — de l'intensité* I_2 *à la base de l'antenne ?*
— de la différence de potentiel aux bornes de L_2 *?*
— des puissances dissipées dans l'antenne P_2 *et dans le primaire* P_1 *?*

Marseille 1940.

SOLUTION :

1° $\lambda = 9\,523$ mètres $\qquad C_1 = 2{,}52$ m.µF.

2° On a : $\qquad M = 200$ µH.s.

L'antenne introduit dans L_1 une résistance apparente :

$$\frac{M^2 \omega^2}{R_2} = 32 \text{ ohms.}$$

La résistance du primaire est :

$$R_1 = \frac{L_1 \omega}{Q_1} = 20 \text{ ohms.}$$

et : $L_1 \omega = 1\,980$ ohms.

La résistance apparente totale $(20 + 32) = 52$ ohms du primaire est négligeable vis-à-vis de $L_1\omega$; d'où les valeurs :

— du courant primaire :

$$I_1 = \frac{10\,000}{1\,980} = 5{,}05 \text{ A};$$

— de la différence de potentiel aux bornes de L_2 :

$$M \omega I_1 = 200 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 31\,500 \times 5{,}05 = 200 \text{ volts};$$

— du courant secondaire :

$$\frac{200}{50} = 4 \text{ A};$$

— des puissances :

$$P_2 = 50 \times 4^2 = 800 \text{ watts};$$
$$P_1 = R_1 I_1^2 = 20 \times 5{,}05^2 = 510 \text{ watts};$$

le rendement du transfert d'énergie, égal à $\frac{P_2}{P_1 + P_2} = 61\ \%$ est notablement inférieur aux taux adoptés en pratique.

4. ***Circuit bouchon et circuits couplés.*** — *Un circuit oscillant se compose :*

a) *d'une self L de 25 microhenrys;*

b) *d'un condensateur C de 1/1 000 de microfarad, selon le schéma suivant* (fig. 14) :

1° *On demande la longueur d'onde propre* λ *du circuit et la fréquence correspondante* N_0.

2° *Pour cette fréquence le facteur de surtension* $\frac{L\omega}{R}$ *vaut* $Q = 157$.

On demande la résistance ohmique R de la bobine. Cette résistance est-elle différente de celle qu'on mesurerait en courant continu ? Dans quel sens ? Quelle est la cause de cette différence ?

3° *Quelle est pour cette fréquence* N_0 *la nature et la valeur de l'impédance entre A et B ?*

4° *On applique entre A et B une différence de potentiel* $U = 6{,}28$ *volts*

efficaces dont la fréquence est N_0. Quel est le courant I_0 dans la self L ? Quel est son déphasage par rapport à la tension ?

Quelle différence de potentiel U faudrait-il introduire en série avec le condensateur C pour produire le même courant dans la self L ?

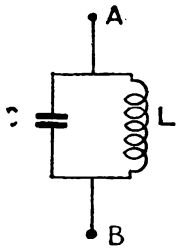


FIG. 14.

5° *La fréquence N de la source U disposée en série avec C étant variable, sans que la tension efficace qu'elle fournit ne change, on tracera la courbe donnant I en fonction de N.*

Quelle est en kilocycles/seconde la bande de fréquence dans laquelle le courant I dans la self reste supérieur à la moitié de la valeur I_0 à la résonance (bande passante à 6 décibels) ?

6° *On couple le circuit en question avec un deuxième circuit en tous points identique* (fig. 15).

Quelle est la valeur de la mutuelle inductance entre les deux selfs L_1 L_2 qui correspond au couplage critique ?

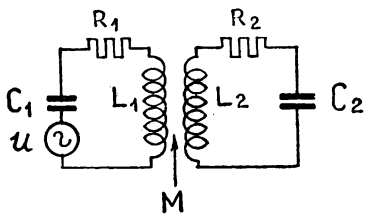


FIG. 15.

On tracera les courbes donnant l'intensité I_2 dans L_2 en fonction de la fréquence N de U pour une valeur de cette mutuelle inductance, d'abord inférieure, puis supérieure à la valeur critique.

Lyon, Juin 1944.

SOLUTION :

1° $\lambda = 300$ mètres $\qquad N_0 = 10^6$.

2° $$R = \frac{25 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6}{157} = 1 \text{ ohm.}$$

3° $Q L \omega_0 = 157 \times 25 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6 = 24\,650$ ohms.

4° $$I_0 = \frac{6{,}28}{25 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6} = 0{,}04 \text{ A.}$$

I_0 est en retard de $\frac{\pi}{2}$ sur U.

$$U = RI_0 = 0{,}04 \text{ volt.}$$

5° *Résonance série. — De* [7-IV] *on déduit :*

$$\frac{I_0}{I} = \sqrt{1 + \left(\frac{314}{10^6}\,\Delta N\right)^2}$$

d'où le tableau :

ΔN	0	2	5	10	en kc/s.
$\frac{I_0}{I}$	1	1,18	1,86	3,3	

L'écart ΔN est tel que :

$$2 = \sqrt{1 + \left(\frac{324}{10^6}\,\Delta N\right)^2}$$

d'où, en élevant au carré les deux membres :

$$\Delta N = 5\,510 \text{ c/s.}$$

6° On a : $M_C^2\omega^2 = R^2$

d'où : $M_C = \frac{R}{\omega}$ soit : 0,16 µ.H.

Les courants I_{1C} et I_{2MAX} sont donnés par (11) et (12) où $R_1 = R_2 = R$;

$$I_{1C} = I_{2MAX} = \frac{E}{2R} = 0{,}02 \text{ A.}$$

La figure 12 donne la forme générale des courbes pour une valeur de M inférieure à M_C (courbe 3) et supérieure à M_C (courbe 1).

CHAPITRE VI

PROPAGATION DES COURANTS SUR LES FILS. ONDES PROGRESSIVES. — ONDES STATIONNAIRES.

Propagation d'un courant sinusoïdal sur une ligne horizontale indéfinie; vitesse de propagation; longueur d'onde; résistance caractéristique de la ligne.

1° On applique à l'origine une f.é.m. :

$$e = E\sqrt{2}\,\sin 2\pi\frac{t}{T} \qquad [1]$$

chaque mètre de fil peut être assimilé au système constitué de la self L_1, de la résistance R_1 et de la capacité C_1 (fig. 1).

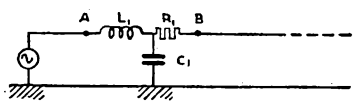


FIG. 1.

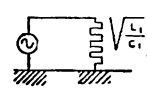


FIG. 2.

2° En H.F., lorsque $R_1 << L_1\omega$, la ligne est équivalente vis-à-vis de la source à une résistance pure $Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$ (*résistance caractéristique de la ligne*) (fig. 2); d'où le courant i_0 et la tension par rapport au sol à l'origine :

$$\begin{cases} i_0 = \dfrac{E\sqrt{2}}{Z_0}\ \sin 2\pi\,\dfrac{t}{T} & [2] \\ v_0 = e & [3] \end{cases}$$

Le courant et la tension se propagent en s'éloignant de la source (ondes progressives) à une vitesse qui, en H.F., est voisine de 3×10^8 m. s.; ils présentent à la distance x (si l'on néglige les pertes) même valeur *efficace* qu'à l'origine avec un déphasage égal à $2\pi\,\frac{x}{\lambda}$.

3° On obtient des résultats analogues dans le cas où la ligne indéfinie est faite de deux fils parallèles (feeder bifilaire de la figure 3) ou d'une conduite tubulaire (fig. 4) (conducteur central isolé par rapport au conducteur externe mis au sol).

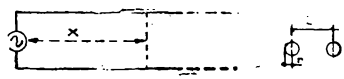


FIG. 3.

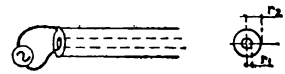


FIG. 4.

Alimentation d'une antenne par ondes progressives.

1° En changeant (fig. 5) la position de K de la position 1 (ligne indéfinie A1C) à 2, le régime de propagation par ondes progressives suivant AB se conserve (les ampèremètres A_1, A_2, etc., indiquent la même intensité) lorsque R est réglé à la valeur Z_0 (résistance caractéristique).

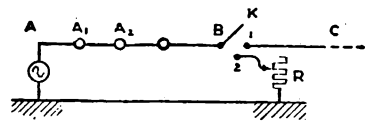


FIG. 5.

2° Une antenne est alimentée par ondes progressives lorsque le feeder débite à son extrémité sur un ensemble adapté ayant, pour la fréquence de l'émission, une résistance égale à Z_0.

Antenne unifilaire horizontale (fig. 6) **ou verticale; résonances.**

1° La résistance en B est infinie; il y a réflexion totale en B et les courants incident et réfléchi en ce point sont en opposition de phase puisque le courant résultant, qui en est la somme, est nul.

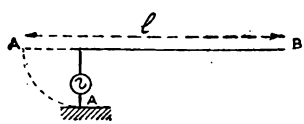


FIG. 6.

2° *Résonances.* — On fait croître progressivement la fréquence de la f.é.m. ; le courant à la *base* passe par des maxima successifs pour des fréquences correspondant à des longueurs d'ondes :

$$\lambda_1 = 4\,l, \qquad \lambda_3 = \frac{4\,l}{3}, \qquad \lambda_5 = \frac{4\,l}{5}, \quad \text{etc.;} \qquad [4]$$

il y a résonance toutes les fois que la longueur d'onde est telle que le retard du courant réfléchi au retour à la base est égal à un nombre entier de périodes, soit à $2K\pi$ (K = nombre entier); d'où la condition de résonance :

$$\alpha = \underbrace{2\pi \frac{l}{\lambda}}_{\text{parcours AB}} + \underbrace{\pi}_{\text{réflexion}} + \underbrace{2\pi \frac{l}{\lambda}}_{\text{retour BA}} = 2K\pi \qquad [5]$$

et les longueurs d'ondes λ_1, λ_3, etc., en donnant à K les valeurs 1, 2, etc.

La figure 7 donne les courbes de répartition du courant et de la tension pour les deux premières résonances :

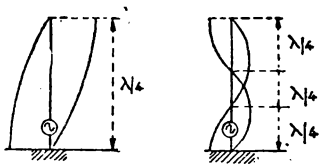


Fig. 7.

— les *nœuds* de courant représentent les points où les courants incident et réfléchi sont en opposition de phase; deux nœuds consécutifs sont espacés de $\frac{\lambda}{2}$;

— entre deux nœuds de courant, le courant *résultant* présente la même phase, en opposition de phase avec le courant sur les tronçons limitrophes;

— les nœuds de courant sont des ventres de tension et réciproquement.

Eléments caractéristiques d'une antenne siège d'ondes stationnaires, de dimensions réduites par rapport à la longueur d'onde de l'émission (antennes à ondes longues et moyennes). — 1° L'expérience montre, en première approximation, qu'une antenne de ce type soumise à l'action d'une source se comporte vis-à-vis de celle-ci comme un circuit oscillant de caractéristiques C_e, L_e, R_e (fig. 8).

2° *Par définition,* la longueur d'onde fondamentale de l'antenne sans organes d'accord est :

$$\lambda_1 = 60\sqrt{C_c L_e}. \qquad [6]$$

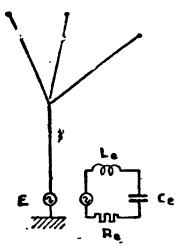


Fig. 8.

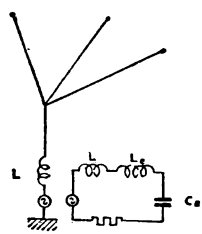


Fig. 9.

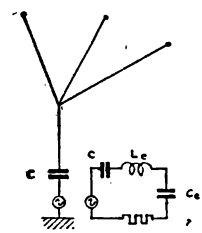


Fig. 10.

Si, à la base de l'antenne, on intercale (fig. 9) une self L, la longueur d'onde de résonance du système, soit λ, devient celle d'un circuit oscillant de caractéristiques C_e, $(L + L_e)$:

$$\lambda = 60\sqrt{C_e (L + L_e)}. \qquad [7]$$

Une capacité C en *série* donne (fig. 10) une longueur d'onde de résonance :

$$\lambda = 60\sqrt{\frac{CC_e}{C + C_e} \times L_e}. \qquad [8]$$

APPLICATIONS.

1. ***Propagation par ondes progressives sur un feeder tubulaire.*** — *Un feeder tubulaire de résistance caractéristique égale à* 96,6 *ohms* ($r_1 = 1$ cm, $r_2 = 5$ cm) *se termine sur une résistance R :*

1° *Valeur à adopter pour R si l'on désire que le feeder soit le siège d'ondes progressives ?*

2° *Un émetteur à l'origine du feeder terminé sur sa résistance caractéristique débite une puissance de* 20 *kWs; calculer :*

— *le courant* I_0, *la tension* V_0 *à l'origine et à une distance x de l'origine;*

— *le retard du courant et de la tension à une distance x par rapport à la f.é.m. de la source (fréquence de la source* = 15 *Mc/s); différence de phase du courant entre deux points espacés de* 5, 10 *et* 20 *mètres.*

3° *Mêmes questions avec un feeder bifilaire de résistance caractéristique égale à* 360 *ohms.*

SOLUTION :

1° On a : $P = 20\,000 = 96{,}6\, I^2_0$, d'où : $I_0 = 14{,}4$ A

$$V_0 = \frac{20\,000}{14{,}4} \text{ soit } 1\,390 \text{ V.}$$

2° En l'absence de pertes, le courant I_x et la tension V_x à la distance x présentent les valeurs I_0 et V_0 ; ils ont, par rapport à ces quantités, un déphasage :

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = 2\pi \frac{x}{20} \ (x \text{ en mètres}),$$

soit pour $x = 5$ mètres par exemple : $\frac{\pi}{2}$.

3° $I_0 = 7{,}4$ A. $\qquad V_0 = 2\,702$ V.

2. ***Adaptation terminale d'un feeder.*** (fig. 11). — *Un feeder bifilaire de résistance caractéristique* $Z_0 = 500$ *ohms reliant une antenne réceptrice en losange à un récepteur se termine entre les points A et B sur les circuits d'adaptation donnant une propagation par ondes progressives sur le feeder; la tension recueillie aux bornes C D est appliquée à l'entrée du récepteur; on donne* $L_1 = L_2 = 1{,}2$ *µH.; la fréquence du*

poste à recevoir est égale à 10 Mc/s; le circuit secondaire est accordé sur ladite fréquence; la tension U_1 entre A et B est égale à 100 μ.V. :

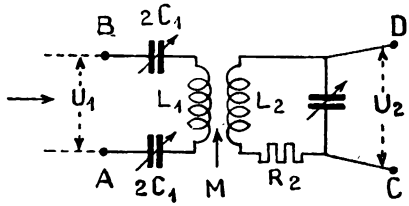


FIG. 11.

1° *Valeur de la capacité C_2 ?*

2° *Quelle valeur faut-il adopter pour les capacités $2C_1$ pour que le feeder se termine sur une résistance pure ?*

3° *Quelle valeur faut-il adopter pour l'induction mutuelle M si l'on désire réaliser la propagation par ondes progressives ? (le coefficient de surtension du secondaire est égal à 100);*

4° *Valeurs correspondantes des courants I_1 et I_2 dans L_1 et L_2 et de la tension U_2 aux bornes de C_2 ?*

5° *Tracer la courbe de sélectivité secondaire.*

SOLUTION :

1° $C_2 = 0{,}21$ m.μ.F.;

2° Le secondaire *accordé* introduit dans L_1 une résistance pure $\frac{M^2\omega^2}{R_2}$; l'ensemble constitué de L_1 et des deux capacités $2C_1$ (équivalentes à une capacité C_1) doit être accordé; d'où : $C_1 = C_2$ et $2C_1 = 0{,}42$ m.μ.F.;

3° On doit avoir : $\frac{M^2\omega^2}{R_2} = R_1$ soit : $M = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{\omega} = \frac{\sqrt{500 \times 0{,}75}}{2\pi \times 10^7}$

soit 0,3 μ.H. (en tenant compte de ce que $R_2 = \frac{L_2\omega}{Q_2} = 0{,}75$ ohm).

4° $I_1 = \frac{U_1}{R_1} = 0{,}5$ μ.A.;

$$I_2 = \frac{M\omega I_1}{R_2} = \frac{0{,}3 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^7 \times 0{,}5}{0{,}75} = 12{,}56 \text{ μ.A.};$$

$$U_2 = 1{,}2 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^7 \times 12{,}56 = 950 \text{ μV.}$$

5° La courbe de sélectivité est celle d'un circuit de self L_2, de capacité C_2 et de résistance $\left(R_2 + \frac{M^2\omega^2}{R_1}\right) = 2R_2$ correspondant à un coefficient de surtension $\frac{Q_2}{2} = 50$

3. QUESTION DE COURS. — *Production d'oscillations au moyen de lampes. Relation de phase entre les tensions de grille et de plaque. Conditions d'entretien. Montage usuel.*

PROBLÈME. — *Une antenne d'émission est alimentée conformément au montage de la figure* 12. *On donne :*

— *la longueur d'onde de l'émission :* 3 000 *m.;*

— *la capacité de l'antenne :* $\frac{6}{1\,000}$ *µF.;*

— *la capacité à la base :* $C_2 = \frac{54}{1\,000}$ *µF.;*

— *la self primaire :* $L_1 = 100$ *µH.s.;*

— *la self d'antenne :* 208 *µH.s.;*

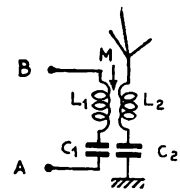


FIG. 12.

— *la résistance totale du circuit d'antenne :* $R_2 = 5$ *ohms; la résistance de perte du circuit primaire est négligeable.*

On se règle de telle façon que la ligne d'alimentation issue de l'émetteur débite sur une résistance pure de 200 *ohms (résistance caractéristique de la ligne) et que la puissance fournie au circuit de l'antenne soit de* 20 *k.W.*

On demande :

1° *la valeur à donner à la self* totale *du circuit d'antenne, la self* L_2 *à ajouter et la capacité primaire* C_1 *pour que ce réglage soit réalisé;*

2° *la valeur des courants dans les circuits primaire et secondaire;*

3° *la tension* U_1 *aux bornes d'entrée A et B et la f.é.m. induite dans le circuit d'antenne;*

4° *le coefficient d'induction mutuelle nécessaire entre les deux circuits;*

5° *le coefficient de couplage correspondant.*

Paris Avril, 1945.

SOLUTION :

1° Capacité équivalente de l'antenne :

$$C = \frac{6 \times 54}{6 + 54} \text{ soit : } \frac{5{,}4}{1\,000} \text{ µF.}$$

Pour que la ligne d'alimentation se termine sur une résistance pure,

il suffit que le primaire et le circuit de l'antenne soient individuellement accordés sur 3 000 mètres; d'où la self totale L du circuit d'antenne :

$$3\,000 = 60\sqrt{5{,}4\,L} \qquad L = 463\ \mu\text{H.s.};$$

la self à ajouter :

$$L_2 = 463 - 208 = 255\ \mu\text{H.s.};$$

et la capacité secondaire :

$$3\,000 = 60\sqrt{100\,C_1} \qquad C_1 = \frac{25}{1\,000}\ \mu\text{F.}$$

2° Le courant primaire I_1 est tel que (puissance 20 kws. livrés à 200 ohms) :

$$200\ I^2{}_1 = 20\,000 \qquad I_1 = 10\ \text{A.}$$

Cette puissance est dissipée dans la résistance de 5 ohms de l'antenne; d'où le courant d'antenne I_2 :

$$5\ I_2{}^2 = 20\,000 \qquad I_2 = 63\ \text{A.}$$

3° U_1 et I_1 sont en phase et l'on a :

$$U_1 = \frac{20\,000}{I_1} = 2\,000\ \text{volts};$$

la f.é.m. induite dans l'antenne en résonance est :

$$E_2 = R_2\,I_2 = 5 \times 63 = 315\ \text{volts.}$$

4° La f.é.m. E_2 est produite par induction mutuelle entre L_1 et L_2 :

$$M\omega I_1 = E_2 \qquad \text{soit :}\ M = \frac{315}{2\pi \times 10^6} \quad \Big| \quad \text{fréquence } 10^5$$

$$M = 50\ \mu\text{H.s.}$$

5° $$m = \frac{50}{\sqrt{100 \times 463}} = 23\ \%,$$

(self secondaire *totale* = 463).

N.-B. — A noter que l'antenne *accordée* introduit dans le primaire *accordé* une résistance apparente $\frac{M^2\,\omega^2}{R_2}$ qui doit être égale à la résistance de 200 ohms du feeder; la relation: $\frac{M^2\,\omega^2}{R_2} = 200$ donne, naturellement, la valeur : $M = 50\ \mu\text{H.s.}$

4. *Résonances dans le cas d'une antenne unifilaire horizontale ou verticale.*

1° *Déterminer les fréquences de résonance obtenues pour une antenne unifilaire verticale de longueur* $l = 22$ m 50; *répartition des courants et des tensions pour la première résonance;*

2° *Le courant en un ventre de courant est égal, pour la deuxième résonance* $\left(\lambda_3 = \frac{4l}{3}\right)$, *à* 5 *ampères; en supposant que ce courant résulte d'un courant incident et d'un courant réfléchi, donner la valeur desdits courants; tracer le diagramme des vecteurs donnant le courant résultant à une distance de* 3,75 *mètres de l'extrémité, somme des deux courants incident* I_i *et réfléchi* I_r.

SOLUTION :

1° $\lambda_1 = 4 \times 22{,}50 = 90$ m. $\qquad N_1 = \frac{10^7}{3}$.

2° $\lambda_3 = \frac{90}{3} = 30$ m. $\qquad N_3 = 3\,N_1$ etc.

3° Au ventre de courant (fig. 7 de droite), le courant résultant est la somme des deux courants en phase; chacun de ceux-ci est égal à $\frac{5}{2} = 2{,}5$ A.; la longueur d'onde de deuxième résonance est :

$$\lambda_3 = 4 \times \frac{22{,}50}{3} = 30 \text{ mètres};$$

à 3,75 m de l'extrémité, le courant I est la somme géométrique (fig. 13) du courant incident I_i et du courant réfléchi I_r de même valeur (2,5 A.) présentant un déphasage :

$$2\pi \frac{3{,}75}{30} + \pi + 2\pi \frac{3{,}75}{30} = \frac{3\pi}{2}$$

d'où :

$$I^2 = 2{,}5^2 + 2{,}5^2 \qquad \text{et } I = 3{,}5 \text{ A.}$$

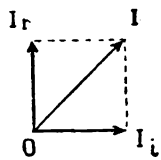


FIG. 13.

5. *Antenne unifilaire avec self ou capacité à la base.* — *Une antenne de réception présente* (fig. 6) *une longueur* $l = 30$ *mètres* (*partie horizontale* $= 20$ *mètres; descente verticale* $= 10$ *mètres*); *sa capacité propre est égale à* $\frac{3}{10\,000}$ µF.

1° *Valeurs de la longueur d'onde propre et de la self propre de l'antenne ?*

2° *Valeur de la self L ou de la capacité C à disposer à la base pour accorder l'antenne respectivement sur* 450 *et* 90 *mètres ?*

SOLUTION :

1° $\lambda_1 = 120$ mètres $\quad L_e = 15{,}3$ µ.H.s.

2° On déduit de [7] et [8] : $L = 174$ µ.H.s. $\quad C = 0{,}4$ m.µ.F

CHAPITRE VII

RAYONNEMENT D'UNE ANTENNE

Champ créé à distance ; hauteur effective ; résistance de rayonnement ; rendement.

1° Une source de fréquence N livre, à la résonance, à une antenne de résistance R_t un courant :

$$I_e = \frac{E}{R_t}. \qquad [1]$$

et une puissance : $P_t = EI_e = R_t I_e^2$. [2]

2° Chaque partie d'antenne participe inégalement au rayonnement d'ondes électromagnétiques qui se réfléchissent à la surface du sol supposé parfaitement conducteur; dans le cas d'une antenne de faibles dimensions par rapport à la longueur d'onde (antenne pour ondes moyennes et longues), on démontre que le champ créé à grande distance r ($r > 3\lambda$) est égal au champ électromagnétique produit (fig. 1) par une antenne fictive verticale S_1S_2 de hauteur h_e, siège *en tout point* du courant I_e ; on obtient ainsi en un point éloigné R, à la suite de la propagation :

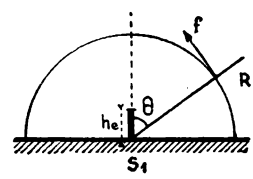


FIG. 1.

— un champ électrique Rf, orienté tangentiellement au cercle de centre S_1 et de rayon r et dont la valeur efficace est :

$$F = 120\,\pi \frac{h_e I_e}{\lambda r} \sin\theta \qquad [3]$$

F en volts par centimètre (V/cm); h_e, λ et r en cm; I_e en ampères; θ = angle de la direction S_1R avec la verticale;

— un champ magnétique Rh perpendiculaire au plan RS_1S_2, de valeur efficace :

$$H = \frac{4\pi}{10} \frac{h_e I_e}{\lambda r} \sin\theta \qquad [4]$$

H en gauss.

F et H sont proportionnels l'un à l'autre; avec les unités adoptées, on a :

$$\frac{F}{H} = 300. \qquad [5]$$

3° h_e, *hauteur effective* de l'antenne, dépend des formes de celle-ci et du mode de répartition du courant; on a, notamment :

— antenne unifilaire verticale de longueur l excitée en quart d'onde :

$$h_e = \frac{2}{\pi} l ; \qquad [6]$$

— antenne unifilaire verticale avec forte self à la base :

$$h_e = \frac{l}{2} ; \qquad [7]$$

— antenne en nappe : h_e légèrement inférieur à la hauteur de la nappe.

4° On a :

$$P_t = \underbrace{(R_0 I_e^2}_{\text{perdue en chaleur}} + \underbrace{R_r I_e^2)}_{\text{rayonnée}} \qquad [8]$$

avec : $$R_r = 160\,\pi^2 \left(\frac{h_e}{\lambda}\right)^2 \quad \Big| \quad R_r \text{ en ohms;} \qquad [9]$$

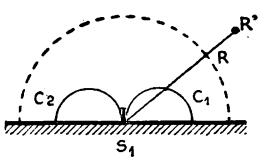


FIG. 2.

le rendement de l'antenne est :

$$\eta = \frac{\text{Puissance rayonnée}}{\text{Puissance totale}} = \frac{R_r}{R_t}. \qquad [10]$$

5° La courbe de directivité dans un plan méridien, obtenue (fig. 2) en portant suivant toute direction S_1R une longueur S_1A (1) proportionnelle au champ recueilli en R est constituée de deux demi-circonférences C_1 et C_2.

Remarque. — Noter : 1 volt/centimètre $= 10^5$ millivolts/mètre;
$= 10^8$ microvolts/mètre.

(1) A = à l'intersection de S_1R et du cercle C_1.

APPLICATIONS.

1. ***Rayonnement d'une antenne dans le cas théorique d'un sol plan parfaitement conducteur.*** — *L'antenne d'un poste d'émission présente, pour la longueur d'onde de* 600 *mètres, une hauteur effective de* 20 *mètres et une résistance totale de* 5 *ohms; cette antenne est le siège d'un courant de* 10 *ampères :*

1° *Valeurs des champs électrique et magnétique au sol à la distance de* 100 *kilomètres ?*

2° *Puissance rayonnée et rendement de l'antenne ?*

3° *Tracer la courbe de directivité de l'antenne dans un plan méridien; valeurs à* 100 *kilomètres du champ électrique pour des inclinaisons par rapport à la verticale :* $\theta = 45°$, $\theta = 60°$?

4° *Déphasage du champ pour deux points R et R' à une distance de* 100 *mètres suivant un même rayon* $S_1 R R'$ (fig. 2) ?

SOLUTION :

1° On a : $F = 120\,\pi \dfrac{2\,000 \times 10}{60\,000 \times 10\,000\,000}$ V/cm

soit 12,56 microvolts par centimètre

d'où : $H = \dfrac{F}{300} = 0{,}042$ microgauss.

2° $P_r = 160\,\pi^2 \left(\dfrac{20}{600}\right)^2 \times 10^2 = 178$ watts;

la puissance antenne totale est :

$$P_t = R_t I_e^2 = 5 \times 10^2 = 500 \text{ watts,}$$

d'où le rendement de l'antenne : $\dfrac{178}{500} = 35{,}6\ \%$.

3° La courbe de rayonnement est faite de deux demi-circonférences (fig. 2); en un point R à 100 kilomètres suivant une inclinaison θ, le champ électrique a pour valeur :

$$F_1 = F \sin \theta$$

d'où : pour $\theta = 45°$, $F_1 = \dfrac{12{,}56}{\sqrt{2}} = 8{,}8$ microvolts par cm;

pour $\theta = 60°$, $F_1 = 12{,}56 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 10{,}88$ microvolts par cm.

4° Le déphasage est :

$$2\pi \frac{RR'}{\lambda} = 2\pi \times \frac{1}{6}, \text{ soit } 60° \text{ ou } \frac{1}{6} \text{ de période.}$$

QUESTION DE COURS. — *Antenne unifilaire horizontale : résonances, régime libre.*

2. PROBLÈME. — *Une antenne d'émission est alimentée par un émetteur à ondes entretenues dont la fréquence est de 20 000 p/s; la tension fournie par l'émetteur est de 300 volts efficaces. La longueur d'onde propre de l'antenne est de 5 000 mètres. Sa capacité 30/1 000 de microfarad. La hauteur effective est de 120 mètres. La résistance totale du circuit est de 3 ohms.*

1° *Quelle est la valeur de la tension aux bornes de la self qu'on est obligé d'ajouter à la base de l'antenne pour avoir la résonance ?*

2° *Quelles sont les valeurs de la résistance de rayonnement et de la puissance rayonnée ?*

3° *Le courant dans l'antenne induit dans un contrôleur d'ondes récepteur une f.é.m. de 2 volts. La self du C.O. est de 15 mH et sa résistance 30 ohms.*

Tracer la courbe de résonance du courant dans le contrôleur lorsqu'on fait varier la capacité d'accord.

Paris, juin 1940.

SOLUTION :

1° Self propre L_e de l'antenne :

$$5\,000 = 60\sqrt{30\ L_e} \qquad L_e = 231 \text{ µ.H.s.}$$

Pour réaliser une longueur d'onde triple, égale à 15 000 mètres (fréquence 20 000), il faut multiplier la self par 3^2 c'est-à-dire disposer à la base une self $8L_e$, soit d'environ 1 850 µ.H.s.

Courant à la résonance : $I_0 = 100$ A.

Tension aux bornes de la self :

$$1\,850 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 20\,000 \times 100 = 23\,276 \text{ V.}$$

2° $R_r = 1\,600 \left(\frac{120}{15\,000}\right)^2$ soit: 0,1 ohm;

$$P_r = 0{,}1 \times 100^2 = 1\,000 \text{ watts.}$$

3° Courant à la résonance : $I_{max} = \frac{2}{30}$ soit 67 m.A.

Capacité de résonance = 4,2 m.μ.F.

D'autre part : $L\omega = 1\,884$ ohms;

pour une capacité 4 m.μ.F. on a : $\frac{1}{C\omega} = 2\,000$ ohms; d'où l'impédance $\sqrt{30^2 + 116^2} = 120$ ohms et le courant correspondant $I = \frac{2}{120}$ soit 16 m.A.; on décrirait d'autres points de la courbe pour d'autres valeurs de C.

3. ***Champ en fonction de la puissance rayonnée.*** — *Une station d'émission émet un signal en ondes entretenues pures sur la longueur d'onde de* 500 *mètres. On sait que le rendement total de la station, c'est-à-dire le rapport de la puissance rayonnée par l'antenne à la puissance absorbée au réseau, est de* 25,6 % ; *d'autre part, la puissance absorbée au réseau atteint* 1 *kW. Calculer les champs électrique et magnétique créés au sol à* 200 *kilomètres.*

SOLUTION :

On élimine la quantité $\frac{h_e I_e}{\lambda}$ entre [3] et l'expression de la puissance $P_r = R_r I_e^2$ où R_r est donné par [9]; d'où l'expression :

$$F = \frac{120}{r}\sqrt{\frac{P_r}{160}} \sin \theta;$$

soit, *au sol,* tous calculs faits : [11] $F = 9{,}4 \frac{\sqrt{P_r}}{r}$ | F en V/cm; P_r en watts; r en cm.

et, pour une puissance de 256 watts : F = 7,6 μ.V/cm.

CHAPITRE VIII

MÉCANISME D'UN AÉRIEN DE RÉCEPTION.

F.é.m. induite dans un élément d'antenne; action résultante (fig. 1). — Une onde électromagnétique induit dans tout élément AB de l'antenne (de longueur $l << \lambda$) une f.é.m. :

$$e = \mathrm{F}\, l \cos\beta \quad \left| \begin{array}{l} e \text{ en volt;} \\ \mathrm{F} = \text{champ électrique en V/cm;} \\ \beta = \text{angle de l'élément avec le champ électrique;} \\ l \text{ en cm.} \end{array} \right. \qquad [1]$$

Le courant résultant en tout point est la somme des courants produits par les f.é.m. élémentaires.

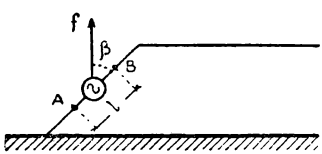


FIG. 1.

Antenne de faibles dimensions par rapport à la longueur d'onde ; hauteur effective. — Dans ces conditions, tous les éléments de l'antenne sont touchés avec de très faibles retards : les f.é.m. élémentaires sont pratiquement en phase et peuvent être remplacées par une f.é.m. unique E proportionnelle au champ agissant F :

$$\mathrm{E} = h_r \mathrm{F} \quad \left| \begin{array}{l} \mathrm{E} \text{ en volts;} \\ h_r \text{ en centimètres;} \\ \mathrm{F} \text{ en V/cm;} \end{array} \right. \qquad [2]$$

où h_r, *hauteur effective* de l'antenne, présente la même valeur que si l'antenne était utilisée à l'émission [relations 6-7-VII]. On déduit de là, l'antenne étant accordée par self, capacité ou groupements de circuits sur la longueur d'onde à recevoir :

— le courant I_r à la base :

$$\mathrm{I}_r = \frac{\mathrm{E}}{\mathrm{R}_t} \quad \left| \; \mathrm{R}_t = \text{ résistance totale de l'antenne;} \right. \qquad [3]$$

— la tension de sortie aux bornes d'un organe, de la self d'accord par exemple :

$$U_L = L\omega_0 I_r = E \times \frac{L\omega_0}{R_t} \quad (\omega_0 = \text{pulsation du poste à recevoir}).$$

La tension U_L est appliquée à la grille d'une lampe amplificatrice. L'antenne de réception rayonne à son tour; sa résistance de rayonnement est donnée par [9-VII] et le champ créé par ce rayonnement par [3-VII].

Réception sur cadre (fig. 2). — Le cadre, accordé par une capacité C sur la fréquence du poste désiré, présente, lorsque le plan vertical des spires passe par le poste émetteur, une hauteur effective :

$$h_r = 2\pi \frac{nS}{\lambda} \quad \left| \begin{array}{l} h_r \text{ en cm;} \\ n = \text{nombre de spires;} \\ S = \text{surface d'une spire en cm}^2. \end{array} \right. \qquad [4]$$

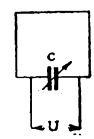


FIG. 2.

De là on calcule la f.é.m. induite (relation 2), le courant (relation 3) et la tension de sortie aux bornes de C, soit :

$$U = QE \quad | \quad Q = \text{facteur de surtension du cadre.}$$

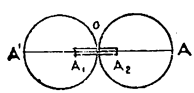


FIG. 3.

Si le plan des spires forme un angle β avec la direction de l'émetteur, la hauteur effective s'obtient en multipliant le résultat de [4] par cos β ; la courbe de réceptivité dirigée dans le plan horizontal est donnée à la figure 3; elle est faite de deux circonférences.

APPLICATIONS.

1. *F.é.m. induite dans un élément d'antenne.*

1° *Valeur de la f.é.m. e induite* (fig. 1) *dans un élément d'antenne de longueur* $l = 2$ *mètres par le champ créé par un émetteur travaillant sur la fréquence de* 500 *kc/s produisant un champ de* 3 *mV/m faisant un angle de* 45° *avec l'élément; comment varie cette f.é.m. élémentaire lorsque* β *varie de* 0 *à* 90° ?

2° *Quel est le retard entre f.é.m. induites dans deux éléments espacés de* 15 *mètres suivant le rayon de la propagation ? Même question pour une émission faite sur* 20 *Mc/s. ?*

SOLUTION :

1° $e = 2 \times 3 \times \cos 45° = 4{,}2$ m.V.; e varie de 6 m.V. à zéro; à noter que $l << \lambda$ ($\lambda = 600$ m).

2° Retard négligeable dans le premier cas :

$$2\pi \times \frac{15}{600}, \text{ soit } 9° \ (2\pi = 360°).$$

Retard très appréciable dans le deuxième cas :

$$2\pi \times \frac{15}{15}, \text{ soit } 360° \text{ ou une période.}$$

2. ***Antenne de faibles dimensions.*** — *Une antenne de réception possède une longueur d'onde propre de* 420 *mètres et sa capacité effective est égale à* 1 *millième de microfarad; sa hauteur effective pour l'onde de* 600 *mètres est égale à* 10 *mètres.*

Cette antenne est accordée à l'aide d'une self et d'une capacité C disposées en série comme il est indiqué par la figure 4. *La capacité C variable peut atteindre* 1 *millième de microfarad; sa valeur résiduelle est le dixième de sa valeur maxima.*

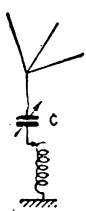


FIG. 4.

1° *Calculer la valeur qu'il faut donner à la self pour que la bande de longueur d'onde sur laquelle il est possible d'accorder l'antenne par variation du condensateur C monte jusqu'à* 900 *mètres.*

2° *Calculer la longueur d'onde minima sur laquelle on peut accorder l'antenne sans changer la self.*

3° *L'antenne est excitée par une émission faite sur* 600 *mètres de longueur d'onde et dont le champ au voisinage de l'antenne est égal à* 45 *microvolts par mètre. Calculer, à la résonance, l'intensité du courant qui parcourt l'antenne, ainsi que la D.D.P. existant aux bornes de la self. La résistance totale de l'antenne (circuit d'accord compris) est égale à* 15 *ohms.*

4° *La D. D. P. recueillie aux bornes de la self est appliquée à l'entrée d'un amplificateur A. Calculer l'amplification que doit réaliser A pour que la D. D. P. alternative recueillie à la sortie atteigne* 1 *volt.*

5° *Faire le schéma d'un récepteur comportant l'amplificateur précédent muni d'une détectrice. On prendra le montage à résistance. Justifier que l'amplificateur réalise bien l'amplification demandée, les lampes utilisées ayant : pouvoir amplificateur :* 10; *résistance interne :* 20 000 *ohms.*

Paris, Juin 1931.

SOLUTION :

1° Self propre de l'antenne : $L_c = 50$ microhenrys; capacité de l'antenne en série avec $C = 0{,}5$ millième; la self d'accord sur 500 mètres L est telle que :

$$900 = 60\sqrt{0{,}5\,(50 + L)} \qquad \text{d'où :} \qquad L = 400 \text{ microhenrys.}$$

2° La capacité minima C, soit 0,1 millième, en série avec la capacité propre de l'antenne $C_c = 1$ millième, donne une capacité équivalente voisine de 0,1 millième correspondant à une longueur d'onde minima :

$$\lambda_m = 60\sqrt{0{,}1 \times 450} = 402 \text{ mètres.}$$

3° La relation [2] donne :

$$E = 45 \times 10 = 450 \text{ microvolts;}$$

$$I_r = \frac{450}{15} = 30 \text{ microampères;}$$

$$U = \frac{400}{10^6} \times 2\pi \times 500\,000 \times 30 = 37\,680 \text{ microvolts.}$$

4° Amplification nécessaire :

$$A = \frac{10^6}{37\,680}, \text{ soit } 27.$$

5° Un seul étage amplificateur ne peut donner une amplification supérieure à $K = 10$; d'où la nécessité d'utiliser deux étages, chacun d'eux donnant une amplification au moins égale à $\sqrt{27}$, soit 6; l'amplification d'un étage étant égale à :

$$K\,\frac{R}{R + r},$$

il faut adopter une valeur de la résistance de couplage R au moins égale à une valeur telle que :

$$10\,\frac{R}{R + 20\,000} = 6$$

d'où : $R = 30\,000$ ohms.

3. ***Réception sur cadre.*** — *Un cadre comporte* 10 *spires carrées de* 1 *m de côté; le champ agissant est égal à* 20 $\mu V.m$ *sur* 500 *kc/s. :*

1° *Calculer la hauteur effective du cadre orienté vers l'émetteur et la f.é.m. induite;*

2° *On accorde le cadre sur* 500 *kc/s; la self* L'_1 *et la résistance* R_1 *du cadre ayant respectivement les valeurs de* 250 μ*H.s et* 10 *ohms, calculer la capacité d'accord* C_1, *le courant et la puissance captée; tension de sortie; valeur du coefficient de surtension du cadre.*

3° *On insère dans le cadre* (fig. 5) *une self* L''_1 *de* 30 μ*H.s. que l'on couple à un secondaire de self* $L_2 = 300$ μ*H.s., de résistance* $R_2 = 6$ *ohms; calculer la nouvelle capacité primaire* C_1, *la capacité secondaire* C_2, *l'induction mutuelle critique* M_c *et, pour cette induction mutuelle, les courants primaire et secondaire.*

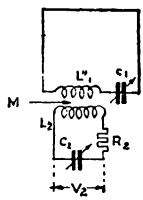


FIG. 5.

SOLUTION :

1° [4] donne :

$$h_r = 2\pi \frac{10 \times 10^4}{60\,000} = 10{,}50 \text{ cm};$$

à noter la très faible valeur de h_r : le cadre est un aérien peu sensible mais donnant une réceptivité dirigée.

$$E = 20 \times 0{,}105 = 2{,}10 \text{ μV.}$$

2° $C_1 = 0{,}4$ mμV. $I_1 = 0{,}21$ μA. $P_0 = 0{,}44$ pW.

$U_1 = 165$ μV. $Q_1 = 79$.

3° $C_1 = 0{,}357$ mμF. $C_2 = 0{,}33$ mμF.

$M_c = 2{,}45$ μHs. $I_{1c} = 0{,}105$ μA. $I_{2c} = 0{,}136$ μA.

4. ***Réception sur cadre.*** — *Un cadre récepteur est composé de* 30 *spires. La surface de chaque spire est de* 1 m^2. *La longueur d'onde propre du cadre est de* 100 *m et la capacité propre de* 20 μμ*F. :*

1° *Calculer la capacité d'accord sur la fréquence de* 500 *kc/s.*

2° *Sachant que la tension V aux bornes de cette capacité est de* 5*mV et que la résistance de l'ensemble est de* 15 Ω, *calculer la valeur du champ magnétique.*

Bordeaux, 1934.

SOLUTION :

1° Pour passer de 100 à 600 mètres, il faut multiplier la capacité d'accord par $6^2 = 36$; d'où la capacité supplémentaire d'accord :

$$35 \times 20 = 700 \text{ μμF.}$$

2° On a :

$$V = E \times \frac{1}{CR\omega} = 5 = E \times \frac{1}{720 \times 10^{-12} \times 15 \times 2\pi \times 500\,000}$$

d'où : $$E = 172 \text{ μV;}$$

de [4] on déduit :

$$h_r = 2\pi \times \frac{30 \times 10^4}{6 \times 10^4} = 31{,}4 \text{ cm},$$

d'où, à partir de [2] :

$$F = \frac{172}{31{,}4} \text{ soit : } 5{,}5 \,\mu V/cm, \text{ ou } 5{,}5 \times 10^{-6} \text{ V/cm}$$

correspondant à un champ magnétique :

$$H = \frac{5{,}5 \times 10^{-6}}{300} \text{ gauss, soit } 18\,300 \,\mu\mu \text{ gauss.}$$

5. ***Réception sur cadre.*** — *Un cadre récepteur de* 20 *spires a une longueur d'onde propre de* 120 *mètres et une capacité propre de* 225 *centimètres. Chaque spire a une surface de* 1 m^2.

1° *Calculer :*

a) *le coefficient de self-induction propre du cadre;*

b) *la valeur de la capacité qu'il faut placer aux bornes du cadre pour l'accorder sur* 600 *mètres;*

2° *Le champ magnétique produit par un émetteur réglé sur* 600 *mètres a une valeur uniforme de* 10^{-6} *U.E.M.C.G.S. dans tout l'espace occupé par le cadre.*

Quelle est la plus grande valeur efficace du courant qu'il est possible d'obtenir dans le cadre, la résistance du circuit du cadre étant 50 *ohms ?*

Pour quelle position du cadre cette valeur du courant est-elle obtenue ?

Août 1932, *Bordeaux.*

SOLUTION :

1° Rappelons que le millième de microfarad vaut 900 centimètres;

d'où : $L = 16 \,\mu Hs.$

b) Pour accorder le cadre sur 600 mètres, c'est-à-dire sur une longueur d'onde 5 fois plus grande, il faut que la capacité soit multipliée par $5^2 = 25$; il faut donc ajouter aux bornes du cadre une capacité 24 fois supérieure à la capacité propre, soit :

$$C = \frac{6}{1\,000} \text{ microfarad.}$$

2° A grande distance de l'émetteur (onde plane), le champ électrique F est lié au champ magnétique par la relation :

$$\frac{F}{H} = 300 \quad \left| \begin{array}{l} F \text{ en volt-centimètre.} \\ H \text{ en gauss.} \end{array} \right.$$

d'où : $F = 300 \times 10^{-6}$ volt-centimètre soit : 300 microvolts-centimètre.

La valeur de la f.é.m. induite dans le cadre, maxima lorsque le plan des spires passe par le poste d'émission, présente la valeur [2] où h_r, hauteur effective du cadre, a pour valeur [4] :

$$h_r = 2\pi \frac{20 \times 10^4}{60\,000} = 21 \text{ cm},$$

soit, tous calculs faits : $E = 6{,}3$ mV; d'où l'intensité du courant dans le cadre accordé :

$$I = \frac{E}{R} = \frac{6{,}3 \times 10^{-3}}{50} \text{ soit } 126 \text{ microampères.}$$

QUESTION DE COURS. — *Détection d'une onde modulée en fréquence; système limiteur discriminateur.*

6. PROBLÈME. ***Influence de la polarisation.*** — *Une liaison à polarisation horizontale comporte de part et d'autre un doublet; ceux-ci, perpendiculaires au même plan vertical ER, sont à plusieurs longueurs d'ondes au-dessus du sol* (fig. 6).

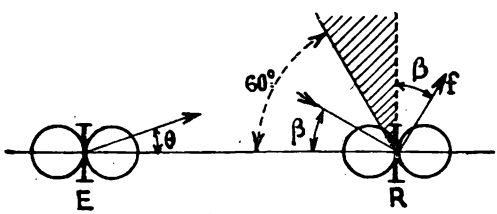


FIG. 6.

1° *Tracer le diagramme du rayonnement dans le plan horizontal. Atténuation en db du champ rayonné dans le plan à* 30°, 45°, 60° *de la direction maximum;*

2° *Un parasite polarisé dans le plan horizontal du doublet récepteur donne un champ cinq fois plus faible que celui du poste reçu; quel est l'écart d'orientation du parasite par rapport à celle du correspondant donnant une protection de* 20 *db vis-à-vis du signal à recevoir ? Tracer un diagramme précisant les zones angulaires d'orientation du parasite donnant la protection susmentionnée ?*

3° *L'influence du susdit parasite étant négligeable, la puissance de l'émetteur est portée de* 10 *à* 50 *W et l'aérien doublet est remplacé de part et d'autre de la liaison par un aérien donnant un champ trois fois plus important. De combien de db est augmenté le rapport signal à bruit de la liaison ?*

On donne : $\log 2 = 0{,}3$, $\log 3 = 0{,}5$.

Nantes, 1955.

SOLUTION :

1° Le champ émis varie comme $\cos\theta$ et présente un affaiblissement sur la direction privilégiée :

$$A = 20 \log \cos\theta;$$

d'où le tableau :

θ	0	30°	45°	60°	90°
$\cos\theta$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
A db	0	— 1	— 3	— 6	

pour $\theta = 30°$ p. ex., $20 \log \frac{\sqrt{3}}{2} = 20 (\log \sqrt{3} - \log 2)$.

$$= 20 \left(\frac{1}{2} \log 3 - \log 2 \right)$$

2° Affaiblissement par rapport au signal dû à la différence d'intensité

$$20 \log \frac{1}{5} = - 14 \text{ db}.$$

Affaiblissement dû à l'orientation β du parasite :

$$20 \log \cos\beta = - (20 - 14) = - 6 \text{ db}; \quad \log \frac{1}{\cos\beta} = 0{,}3$$

$$\cos\beta = 0{,}5 \qquad \text{et} \qquad \beta = 60°.$$

D'où, en hachuré, la protection à 20 db.

3° Le champ est multiplié par $\sqrt{5}$; le gain du rapport croît de la somme :

$$20 (\log \sqrt{5} + \log 3 + \log 3) = 27 \text{ db}.$$

QUESTION DE COURS. — *Principe du redressement à simple et à double alternance.*

7. PROBLÈME. ***Rapport signal à bruit.*** — *Un émetteur en A ($\lambda = 6$ m) donne en B à la distance Dkm, pour un rayonnement de 1 kW, un champ en db au-dessus du μV :*

$$H = 107 - 40 \log D.$$

On règle à 10 W la puissance rayonnée en A; le récepteur en B donne un rapport de signal à bruit de 20 db pour une tension d'entrée de 10 μV modulée à 100 %; le gain de l'antenne d'émission par rapport à un dipôle est de 7 db; la hauteur effective du dipôle récepteur est de 2 m; on néglige

les pertes dans les feeders, l'influence des distorsions non linéaires dans l'émetteur et le récepteur ainsi que le bruit d'éther; seul subsiste le bruit propre du récepteur.

1° *Valeur du rapport signal à bruit en B à 50 km;*

2° *Puissance de l'émetteur donnant, dans les mêmes conditions, un rapport signal/bruit de 48 db;*

3° *La puissance étant celle du 2°, on règle le taux de modulation à une valeur donnant une amplitude de crête double de celle des creux; valeur du nouveau rapport signal/bruit;*

4° *On désire multiplier par 3 le rapport des tensions signal à bruit du 3° en augmentant le gain de l'antenne réceptrice.*

Valeur de G et valeur du rapport signal/bruit.

On donne : $\log 3 = 0{,}5$; $\log 2 = 0{,}3$.

SOLUTION :

1° Pour D = 50 km, on a :

$$H = \left(107 - 40 \log \frac{100}{2}\right) = 39 \text{ db.}$$

Atténuation due à la réduction de la puissance à 10 W (réduction du champ à $\frac{1}{10}$ de la valeur) $= -20$ db.

Gain antenne d'émission $= +7$ db.

Gain dû à hauteur effective antenne : $20 \log 2 = 6$ db.

Gain total au-dessus de 1 μV/m pour la f.é.m. antenne réceptrice :

$$39 - 20 + 7 + 6 = 32 \text{ db.}$$

Rapport signal/bruit pour 1 μV d'entrée du récepteur modulé à 100 % et pour une tension d'entrée de 32 db : 32 db.

2° Le gain de puissance correspond à $(48 - 32) = 16$ db avec une nouvelle puissance P telle que :

$$10 \log \frac{P}{10} = 16;$$

soit : $\log \frac{P}{10} = \log 10 + 0{,}6, \qquad \log \frac{P}{100} = \log 2 + \log 2 = \log 4,$

$$\text{et : } P = 400 \text{ W.}$$

3° Taux de modulation : M = 0,5.
Atténuation du signal : $20 \log 0{,}5 = -6$ db.
Rapport signal/bruit : $(48 - 6) = 42$ db.

4° Gain de l'antenne de réception : $20 \log 3 = 10$ db.
Signal/bruit : 52 db.

CHAPITRE IX

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES LAMPES A PLUSIEURS ÉLECTRODES.

Caractéristiques d'une triode et d'une pentode. — La figure 1 donne les caractéristiques d'une triode : chaque courbe est obtenue, le potentiel de plaque V_p étant constant, en faisant varier le potentiel de la grille V_g.

Rappelons que, dans une pentode, on rencontre successivement (fig. 2) : le filament, la grille de commande, la grille écran, la grille d'arrêt et la plaque; les figures 3 et 4 donnent les courbes caractéristiques d'une pentode : à la figure 4, on fait varier le potentiel V_p pour des valeurs constantes du potentiel V_{g1} de la grille de commande.

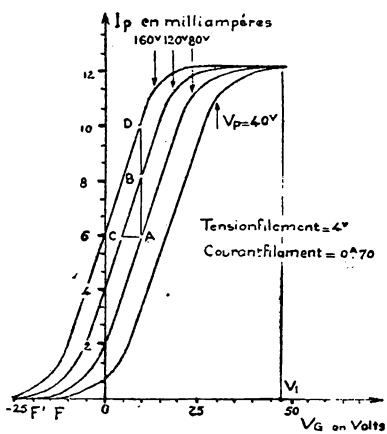


FIG. 1.

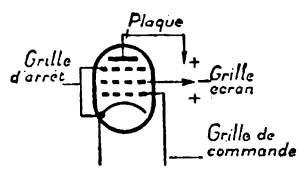


FIG. 2.

Pouvoir amplificateur, résistance intérieure et pente d'une triode (fig. 1).

1° Pour des valeurs :

$V_p = 80$ volts, $V_g = 10$ volts on a : $I_p = 5{,}8$ mA point de fonctionnement en A;

pour :

$V_p + \Delta V_p = 120$ V, $\quad V_g = 10$ V,

$I_p + \Delta I_p = 7{,}9$ mA,

point de fonctionnement en B;

$V_p + \Delta V_p = 120$ V, $\quad V_g + \Delta V_g = 4{,}5$ V,

$I_p = 5$ mA,

point de fonctionnement en C;

l'accroissement de potentiel de plaque $\Delta V_p = 40$ volts n'entraîne aucun accroissement de I_p si l'on procède simultanément à une diminution $\Delta V_g = 5{,}5$V; le *pouvoir amplificateur* est défini par la relation :

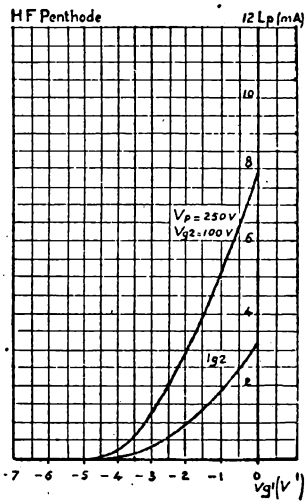


FIG. 3.

$$K = -\frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} = \frac{40}{5{,}5} = 7{,}3; \quad [1]$$

cela revient à dire qu'un accroissement de 1 volt du potentiel de la grille produit le même effet qu'un accroissement de 7,3 volts du potentiel de la plaque.

2° V_g étant fixe, on donne à V_p des accroissements ΔV_p et l'on note les accroissements correspondants ΔI_p du courant de plaque : le point de fonctionnement passe de A à B pour $\Delta V_p = 40$ volts, de A à D pour $\Delta V_p = 80$ volts; l'accroissement ΔI_p est proportionnel à ΔV_p : 2,1 mA en passant de A à B, $(2{,}1 \times 2)$ en passant de A à D ; la *résistance intérieure* est :

$$r = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} = \frac{40}{\frac{2{,}1}{1\,000}} = 19\,050 \text{ ohms}; \quad [2]$$

la lampe se comporte comme une résistance de 19 050 *ohms vis-à-vis des variations du courant* I_p.

3° V_p étant constant (120 V par exemple et V_g égal à 4,5 V), on donne à V_g une variation $\Delta V_g = 5{,}5$ volts qui amène le point de fonctionnement de C en B sur la caractéristique $V_p = 120$ V; la *pente* de la caractéristique au point C (soit au point A) est :

$$S = \frac{\Delta I_p}{\Delta V_g} = \frac{2{,}1}{5{,}5} \text{ soit } 0{,}4 \text{ mA/V}. \quad [3]$$

4° V_p étant constant et égal à 120 volts, le point de fonctionnement se déplace sur la caractéristique correspondante depuis F′ en passant par A jusqu'au courant de saturation lorsque V_g croît de — 20 volts à + 40 volts environ; la pente, nulle en F′, croît jusqu'à un maximum en A pour diminuer jusqu'à zéro en arrivant à la saturation; en tout point A il existe une relation entre K, r et S :

$$S = \frac{K}{r}; \qquad [4]$$

K étant pratiquement constant en tout point, les quantités S et r varient en sens opposé.

Equation de la surface caractéristique au voisinage d'un point.

1° En l'absence de signal, la lampe d'un récepteur est soumise à des

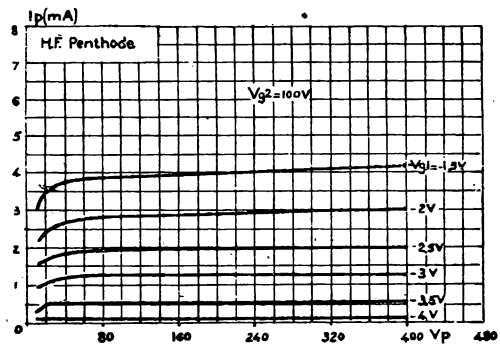


FIG. 4.

tensions constantes des électrodes qui déterminent un courant donné de plaque et la position A du point de fonctionnement.

2° L'arrivée d'un signal donne une variation du potentiel de la grille, donc une variation du courant de plaque et, indirectement, une variation du potentiel de la plaque; le point de fonctionnement se déplace sur la surface caractéristique; si le signal est relativement faible, on peut assimiler la portion utilisée de la surface caractéristique au plan tangent au point A, plan dont l'équation est de la forme :

$$rI_p = V_p + KV_g - p \qquad [5]$$

où : K = pouvoir amplificateur; r = résistance intérieure au point A.

3° Dans le cas d'une pentode qui correspond à de fortes valeurs de

K et r, on peut, en divisant les deux membres de [5] par r, négliger $\frac{V_p}{r}$ et l'on obtient, compte tenu de [4] :

$$I_p = SV_g - q \qquad [6] \qquad \left(q = \frac{p}{r} = \text{quantité constante}\right).$$

S étant la pente au point A autour duquel s'effectuent les déplacements du point de fonctionnement; on note que I_p ne dépend pas de V_p, résultat pratiquement exact (fig. 4) pour les valeurs de V_p supérieures à 40 volts environ.

APPLICATIONS.

1. ***Forme des caractéristiques d'une lampe à trois électrodes.*** — *On donne* (fig. 5), *pour diverses valeurs du potentiel de grille* V_g, *les caractéristiques du courant de plaque* I_p *en fonction du potentiel de plaque* V_p *:*

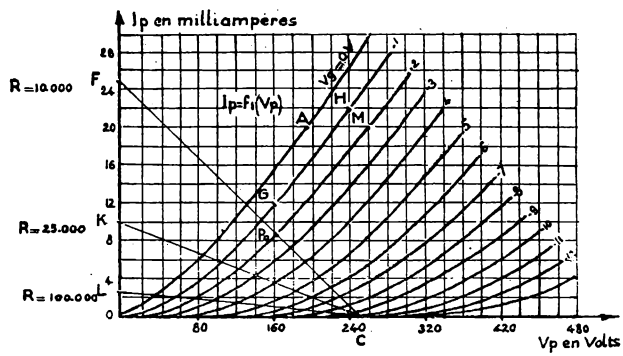


FIG. 5.

1° *Tracer, pour les potentiels de plaque* V_p *respectivement égaux à* 100-150-200 *et* 250 *volts, les caractéristiques du courant* I_p *en fonction de* V_g *; on se limitera aux valeurs négatives de* V_g.

2° *Déterminer, à partir de l'un ou l'autre réseau de caractéristiques, la valeur du pouvoir amplificateur.*

3° *Déterminer, pour les parties rectilignes des caractéristiques, la valeur de la pente et de la résistance intérieure de la lampe; vérifier la relation entre la pente, la résistance intérieure et le pouvoir amplificateur de la lampe.*

4° *Déterminer l'équation de la surface caractéristique correspondant à la partie plane.*

5° *Comment varient la pente et la résistance intérieure en fonction du potentiel de la grille pour un potentiel de plaque* $V_p = 200$ *volts.*

SOLUTION :

1° Voir la figure 6.

2° Le courant de plaque I_p conserve la même valeur de 20 milliampères lorsque (fig. 5) le point figuratif passe de A ($V_g = 0$ volt, $V_p = 188$ volts) à M ($V_g = -2$ volts, $V_p = 252$ volts); le pouvoir amplificateur est donc : $K = \frac{252 - 188}{2} = 32$.

De même (fig. 6) le courant I_p ne se modifie point en passant de B ($V_g = -0{,}9$ volts $V_p = 150$ volts) à C ($V_g = -4$ volts $V_p = 250$ volts);

d'où : $K = \frac{250 - 150}{4 - 0{,}9}$

soit 32 aux approximations près.

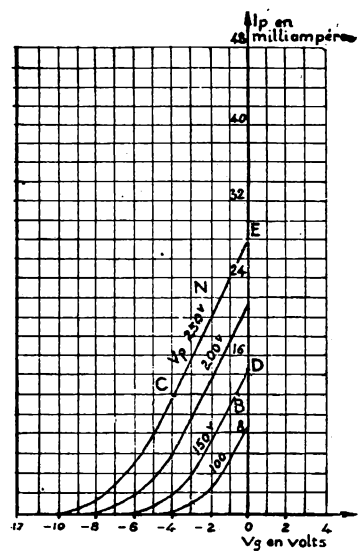


FIG. 6.

3° *Résistance intérieure :* V_g étant constant (nul par exemple), le courant de plaque croît de 15 mA à 27,5 mA lorsque le potentiel de la plaque passe de 150 à 250 volts; le point figuratif passe de D à E (fig. 6) et la résistance intérieure de la lampe est :

$$\frac{250 - 150}{\frac{27{,}5 - 15}{1\,000}} = 8\,000 \text{ ohms.}$$

On obtient le même résultat à partir des courbes de la figure 5 : V_g étant constant et égal à — 1 volt par exemple, le courant croît de 10 mA lorsque le potentiel de plaque croît de 80 volts (le point figuratif passe de G à H); d'où :

$$r = \frac{80}{\frac{10}{1\,000}} = 8\,000 \text{ ohms.}$$

La connaissance de K et r donne la pente :

$$S = \frac{K}{r} = \frac{32}{8\,000} = 4 \text{ m A/V.}$$

La figure 6 donne directement la pente :

$$P = \frac{BE}{CB} = \frac{\frac{16}{1\,000}}{4} = 4 \text{ m A/V.}$$

4° Elle est de la forme :

$$8\,000\, I_p = V_p + 32\, V_g - p.$$

La valeur de p s'obtient en écrivant que le point G de coordonnées :

$$I_p = \frac{12}{1\,000} \qquad V_p = 160 \text{ volts} \qquad V_g = -1 \text{ volt}$$

appartient à la surface :

$$8\,000 \times \frac{12}{1\,000} = 160 - 32 - p$$

d'où $p = 32$.

5° La pente, nulle pour $V_g = -8{,}5$ volts, croît pour atteindre sa valeur maxima de 4 m A/V pour un potentiel de grille de -3 volts; cette valeur se conserve le long de la partie rectiligne de la caractéristique. Lorsque le point figuratif se déplace en montant de gauche à droite le long d'une caractéristique à potentiel V_p constant (fig. 6), la pente croît, K demeure constant et égal à 32 et r décroît d'une valeur théoriquement infinie à un minimum de 8 000 ohms; la relation : $S = \frac{K}{r}$ subsiste et le produit Sr est donc constant; l'expérience donne, pour $V_p = 200$ volts :

V_g	$-8{,}5$	$-7{,}2$	$-6{,}5$	$-5{,}8$	-4	-3
r ohm	∞	230 400	72 000	16 000	12 000	8 000
S mA/V	0	0,14	0,44	1,8	2,5	4

Pour de *faibles* variations des potentiels de grille et de plaque autour d'une valeur déterminée, on peut admettre que la relation entre

I_p, V_p et V_g est du premier degré, r et S ayant la valeur correspondant à la portion intéressée de la surface caractéristique : cela revient à confondre la portion intéressée de cette surface avec le plan tangent; lorsque les écarts de V_g et V_p augmentent, il en résulte généralement des distorsions qui restent acceptables tant que les écarts sont inférieurs à des taux déterminés.

2. ***Lampe pentode de réception.*** — *Déterminer la pente S et l'équation des caractéristiques d'une lampe pentode représentées aux figures* 3 *et* 4 *lorsque* V_{g_1} *est compris entre* $-1{,}5$ *volt et* 0 *volt.*

Valeurs correspondantes de K et r ? Valeur de V_{g_1} *donnant un courant* $I_p = 3\ mA$*; valeur de la pente au point correspondant ? On suppose* $V_{g_2} = 100$ *volts.*

SOLUTION :

Le courant (fig. 3) croît de 4 à 7,75 mA lorsque, sur la partie sensiblement rectiligne, V_{g_1} croît de $-1{,}5$ à 0 volt; d'où :

$$S_{max} = \frac{7{,}75 - 4}{1{,}5} \text{ soit : } 2{,}5 \text{ mA/V.}$$

$$\text{Pour } V_{g_1} = 0 \qquad I_p = \frac{7{,}75}{1\,000} \text{ ampère;}$$

$$\text{d'où [relation 6] : } q = -\frac{7{,}75}{1\,000};$$

l'équation cherchée, où I_p est exprimé en mA et S en mA/V, est :

$$I_p = 2{,}5\, V_{g_1} + 7{,}75.$$

La détermination de K et r ne peut se faire pratiquement en raison de l'imprécision des mesures graphiques sur les courbes données; il faut, à ce sujet, une détermination expérimentale. La figure 4 montre que I_p croît de 3 à 4 mA lorsque V_{g_1} croît de -2 à $-1{,}5$ volt; d'où la pente au voisinage du point correspondant à $I_p = 3$ mA, soit 2 mA/V.

3. ***Caractéristiques d'une lampe à trois électrodes de réception.*** — *On trace les caractéristiques statiques d'une lampe à trois électrodes donnant les valeurs du courant plaque* I_p *en fonction de la tension de grille* V_g*. Ces caractéristiques sont supposées parfaitement rectilignes et parallèles entre elles. La caractéristique* $V_p = 60$ *volts passe par l'origine* O *des coordonnées et par le point A* ($V_g = 2$ *volts;* $I_p = 4$ mA)*; la caractéristique* $V_p = 100$ *volts passe par le point A'* ($V_g = 0$*;* $I_p = 4$ mA).

1° *Pour une tension plaque* $V_p = 120$ *volts, quelle polarisation doit-on appliquer à la grille pour se trouver au point de naissance du courant de plaque ?*

2° *Quelle est la résistance interne de la lampe ?*

3° *Quel est le pouvoir amplificateur de la lampe ?*

4° *Equation de la surface caractéristique dans la région plane.*

5° *Tracer la caractéristique* $V_p = 150$ *volts.*

6° *On intercale en série dans le circuit plaque de la lampe une résistance* $R = 20\,000$ *ohms pour une f.é.m. de plaque* $E = 120$ *volts et* $V_g = 0$ *volt :*

— *Valeur du courant continu de plaque et de la tension de plaque ?*

— *Quelle est la valeur de la tension sinusoïdale qu'il faut appliquer à la grille de la lampe pour que l'on puisse disposer aux bornes de R d'une tension sinusoïdale de 2 volts.*

Le Havre, 1936.

SOLUTION :

1° Traçons (fig. 7) les deux caractéristiques parallèles OA et O'A' correspondant aux deux tensions de plaque de 60 et 100 volts; un accroissement de V_g égal à 40 volts (de 60 à 100 volts) fait glisser la caractéristique de 2 volts vers la gauche; le glissement dans le même sens est de 1 volt lorsque V_p passe de 100 à 120 volts : la caractéristique BC ($V_p =$ 120 volts) prend naissance en B pour un potentiel de grille $V_g = -3$ volts.

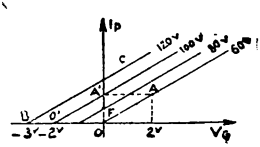


FIG. 7.

2° Un accroissement $\Delta V_p = 40$ volts donne, le potentiel de la grille étant constant et nul, un accroissement $\Delta I_p = 4$ mA (le point figuratif passe de O à A'); la résistance intérieure est :

$$r = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} = 10\,000 \text{ ohms.}$$

3° Il n'y a aucune modification du courant de plaque lorsque, simultanément, on diminue le potentiel de la grille de $\Delta V_g = 2$ volts en augmentant le potentiel de la plaque de $\Delta V_p = 40$ volts (le point figuratif passe de A à A');

$$\text{d'où :} \qquad K = \frac{\Delta V_p}{\Delta V_g} = 20.$$

4° Elle est de la forme :

$$10\,000\, I_p = V_p + 20\, V_g - p. \qquad [1]$$

p se détermine en écrivant que la caractéristique $V_p = 60$ volts passe par O : $0 = 60 - p$ d'où $p = 60$. [2]

5° La caractéristique $V_p = 150$ volts prend naissance en D d'abscisse $-4{,}5$ volts.

6° La tension de plaque est :

$$V_p = 120 - RI_p;$$

d'où, compte tenu de [1] et de [2] :

$$10\,000\, I_p = (120 - 20\,000\, I_p) - 60$$

d'où : $$I_p = 2\,\text{mA}$$

$$V_p = 120 - 20\,000 \times \frac{2}{1\,000} = 80 \text{ volts};$$

le point de fonctionnement est en F sur la caractéristique $V_p = 80$ volts. La tension sinusoïdale U à appliquer à la grille est telle que :

$$2 = 20\,U \times \frac{20\,000}{30\,000}$$

d'où : $$U = 0{,}15 \text{ volt.}$$

CHAPITRE X

AMPLIFICATION A HAUTE FRÉQUENCE DANS LES RÉCEPTEURS.

Les diverses classes d'amplification. — La figure 1 représente l'étage amplificateur : en l'absence de signal, la grille est polarisée négativement (tension $-U_0$) ; on applique ensuite à la grille le signal sinusoïdal U et l'on recueille un courant de plaque alternatif donnant une tension de sortie V supérieure à U à travers le bloc de charge ABCD.

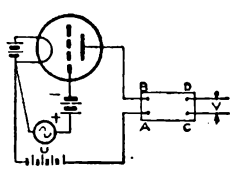


FIG. 1.

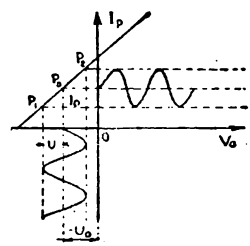


FIG. 2.

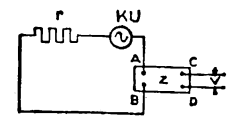


FIG. 3.

1° *Réglage en classe A.* — Le signal présente une amplitude suffisamment réduite pour que l'on puisse confondre la portion de surface caractéristique avec son plan tangent; le point caractéristique étant en P_0 à l'état de repos, l'arrivée d'un signal donne superposition au courant I_0 d'un courant sinusoïdal qui se calcule à partir de la figure 3; la tension du signal U apparaît dans le circuit de plaque sous forme d'une f.é.m. KU; la lampe réagit vis-à-vis des variations du courant de plaque (signal) comme une résistance *r*.

2° *Réglage en classe B.* — La tension $-U_0$ conduit le point P_0 à l'origine inférieure de la caractéristique (courant de plaque nul) (fig. 4); le signal donne un courant de plaque redressé.

3° *Réglage en classe C.* — La tension $-U_0$ est plus accentuée qu'en classe B ; le point de fonctionnement est en P_0 et l'amplitude U est

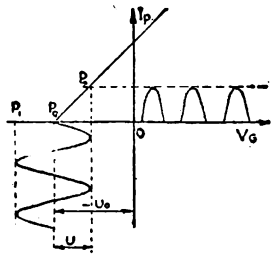


FIG. 4.

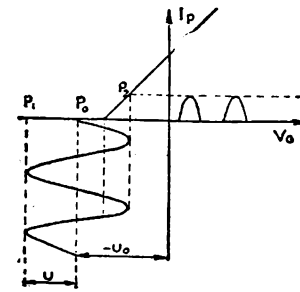


FIG. 5.

suffisante pour que le courant de plaque ne soit pas nul en permanence (figure 5).

Conditions à réaliser dans l'amplification H. F. dans les récepteurs.

L'amplification est définie (1) par : $A = \frac{V}{U}$ $\left\{\begin{array}{l} U = \text{tension d'entrée;} \\ V = \text{tension de sortie.} \end{array}\right.$

1° *En télégraphie : a*) Grande amplification pour la fréquence N_0 du poste à recevoir;

b) Sélectivité convenable : l'amplification doit décroître rapidement autour de N_0 ;

2° *En téléphonie :* a) Fidélité de transmission : la tension U du signal appliqué à la grille est modulée téléphoniquement et comporte une bande de fréquences qui doit être *uniformément amplifiée* ($\pm$ 10 kc/s autour de N_0 en radiodiffusion ; $\pm$ 3 kc/s en téléphonie commerciale) ;

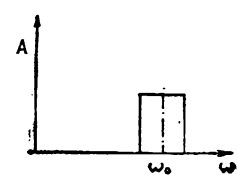


FIG. 5 *bis*

b) *Sélectivité :* l'amplification doit décroître très rapidement lorsque la fréquence sort du canal occupé par les signaux; la figure 5 *bis* donne la forme idéale de la courbe d'amplification;

c) *Amplification maxima,* sous réserve des deux premières conditions.

Lampes utilisées ; constitution du bloc de couplage.

1° On utilise uniquement des lampes pentodes ou analogues dont l'absence de capacité appréciable entre grille de commande et plaque empêche la production d'oscillations parasites;

(1) Soit, en décibels, en adoptant comme niveau de référence la tension d'entrée U, le gain d'amplification.

$$G = 20 \log \frac{V}{U} \text{ décibels.}$$

2° Le bloc de couplage est du type à résonance à simple ou à double circuit (filtre de bande).

L'amplification à résonance dans les récepteurs. — En pratique le bloc de couplage dans l'amplification H.F. dans les récepteurs est du type à résonance à simple ou à double circuit.

1° *Couplage à simple circuit* (fig. 6). — Le bloc est constitué du circuit CLR que l'on accorde sur la fréquence du signal de grille à amplifier.

a) *En l'absence de signal :* un courant continu (sens de la flèche F) se ferme à travers la bobine; R étant très faible, le potentiel du point B est celui du point A (tension de la source de plaque); le condensateur C_1

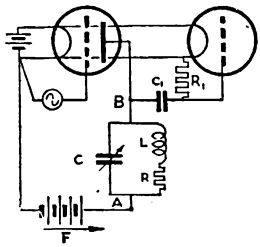


FIG. 6.

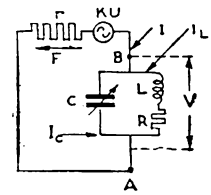


FIG. 7.

à une armature (à gauche) au potentiel de B tandis que l'autre armature est au potentiel du filament à travers une forte résistance R_1 ; en l'absence du condensateur de blocage C_1, la grille de la deuxième lampe serait portée au potentiel A de la plaque de la première lampe;

b) *Lors de l'arrivée d'un signal :* au courant I_0 se superpose le courant sinusoïdal résultant de la figure 7 où r est la résistance intérieure de la lampe pour la position choisie sur la surface caractéristique (1), la f.é.m KU se partage entre la résistance r et l'impédance du circuit bouchon entre A et B proportionnellement aux valeurs relatives de ces quantités; or l'impédance du circuit bouchon est maxima et égale à une résistance R_0 lorsque celui-ci est accordé sur la pulsation ω_0 du poste à recevoir; on a:

$$R_0 = \frac{L^2\omega_0^2}{R} = \frac{L}{CR} = QL\omega_0 = Q^2R \left.\right\} Q = \text{coefficient de surtension du circuit;} \qquad [1]$$

d'où le courant sinusoïdal de plaque :

$$I = \frac{KU}{r + R_0} \qquad [2]$$

la tension aux bornes du circuit oscillant :

$$V = R_0 I = KU \times \frac{R_0}{r + R_0} \qquad [3]$$

(1) En toute exactitude, il faut ajouter entre A et B à la figure 7 la branche C_1R_1; mais C_1 est un vrai court-circuit et R_1 se combine en parallèle avec R_0.

et le courant dans le circuit oscillant :

$$I_L = I_0 = \frac{V}{L\omega_0} = QI. \qquad [4]$$

Dans le cas pratiquement rencontré d'une pentode on peut négliger R_0 vis-à-vis de r ; les relations [2] et [3] deviennent :

$$I = \frac{K}{r} U = SU \qquad [5]$$

$$V = SUR_0 \left\{ \begin{array}{l} S = \text{pente pour la portion utilisée} \\ \quad \text{de la surface caractéristique.} \end{array} \right.$$

2° *Couplage à transformateur à secondaire accordé* (fig. 8). — Le cou-

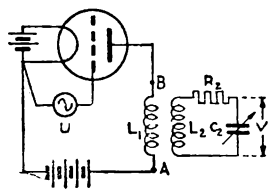


FIG. 8.

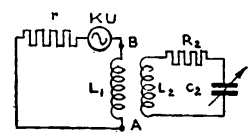


FIG. 9.

rant dû au signal se déduit de la figure 9; dans le cas d'une pentode, le courant dans L_1 est donné par [5] et produit dans le secondaire une f.é.m.:

$$E_2 = M\omega I, \qquad [6]$$

un courant I_2 et une tension de sortie V : $I_2 = \frac{E_2}{R_2}$ [7]

$$V = L_2\omega I_2. \qquad [8]$$

Couplage par éléments non accordés.

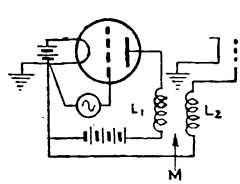


FIG. 10.

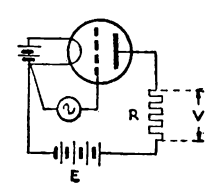


FIG. 11.

1° *Couplage par transformateur* (fig. 10). — Le courant dans L_1 produit par un signal est :

$$I = \frac{KU}{\sqrt{r^2 + L_1^2\omega_0^2}} \qquad [9]$$

d'où, la tension de sortie : $V = M\omega I$. [10]

2° *Couplage par résistance* (fig. 11).

a) Potentiel plaque en l'absence de signal : $V_p = (E - RI_p)$;

b) On calcule I et la tension aux bornes de R (fig. 12) :

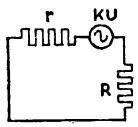


Fig. 12.

$$I = \frac{KU}{r + R}, \qquad V = RI = KU\frac{R}{r + R};$$

soit, avec une pentode : $V = SUR$.

La tension de sortie est transmise à la grille de la lampe à travers l'ensemble $C_g R_g$ (fig. 13).

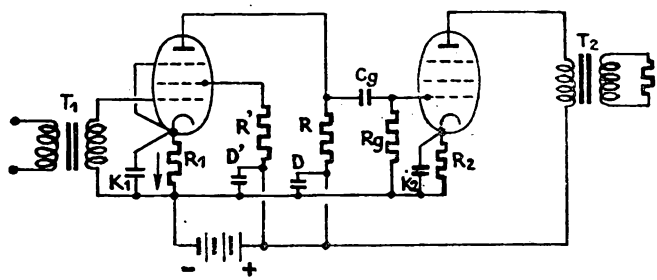


Fig. 13.

3° Les couplages non accordés, dépourvus de sélectivité, ne sont utilisés que dans des cas très particuliers en H.F.

APPLICATIONS.

Question de cours. — *Oscillations libres d'un circuit constitué d'une self, d'une capacité et d'une résistance en série.*

Problème. ***Amplification à H.F.*** — *On a* (fig. 14) : *pente de la lampe :* $S = 2$ *mA/V; résistance pratiquement infinie;* $L = L' = 10$ *µH.*

1° *Valeur de C donnant l'accord sur* 1 *Mcs;*

2° *Valeur en fonction de M de la f.ém. E induite dans L avec* $U = 1$ *V;*

3° *Valeur de la tension V en fonction de M pour* 1 *Mc/s avec :* $Q = 50$;

4° *Valeur de M et du coefficient de couplage m tels que* $V = U$.

Marseille, 1954.

SOLUTION :

1° $C = 2{,}5$ mμF.

2° Courant de plaque : $I_p = SU = 2$ mA pour toute fréquence; $E = M\omega I_p = 4\,000\ \pi M$.

3° $V = QE = 2 \times 10^5\ \pi M$.

4° $V = U$, $M = 1{,}6\ \mu H$, $m = 0{,}16$.

QUESTION DE COURS. — *Navigation hyperbolique. Principe des principaux systèmes utilisés.*

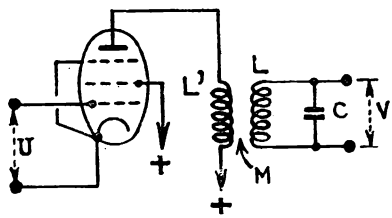


FIG. 14.

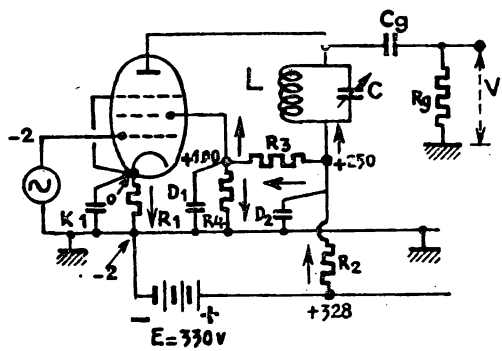


FIG. 14 *bis*.

PROBLÈME 1 *bis*. ***Amplification à H.F.*** — *Un catalogue de lampes donne les renseignements suivants sur la pentode d'un amplificateur H.F. (fig. 14 bis)* :

Tension d'anode	250 V
Courant d'anode	3 mA
Polarisation grille	— 2 V
Tension de la grille-écran	100 V
Courant de la grille-écran	1 mA
Pente normale	2 mA/V

La f.é.m. de la source $E = 200$ *V.*

1° *Calculer* R_1, R_2, R_3 *et* R_4 *donnant les conditions susmentionnées; on note que le courant dans* R_2, R_3 *et* R_4 *doit être d'au moins* 4 *mA. Ordre de grandeur des condensateurs* K_1, D_1 *et* D_2.

2° *Circuit oscillant de plaque accordé sur la fréquence* 800 *kc/s du signal d'entrée; bobine :* $L = 200$ *µH,* $R = 20$ *ohms.*

Valeur de R_g *donnant* $V = 50$ *mV pour* $U = 1$ *mV; on précise que la bande passante de l'étage doit être aussi grande que possible (prendre* $2\pi = 6{,}25$).

Bordeaux, 1951.

SOLUTION :

1° La figure 14 *bis* porte les tensions aux divers points par rapport à la cathode de la lampe et indique le sens des courants continus; $R_1 = 500\ \Omega$.

Le courant continu le plus faible est dans R_4; on le fixe au minimum admissible 4 mA;
d'où :

$$R_4 = \frac{100}{\frac{4}{1\,000}} = 25\,000\ \Omega;\ \text{courant dans } R_3 = 5\ \text{mA};$$

d'où :
$$R_3 = \frac{150\,000}{5} = 30\,000\ \Omega,$$

courant dans $R_2 = 8$ mA et $R_2 = \dfrac{78\,000}{8} = 9\,750\ \Omega.$

2° Amplification :

$$\frac{V}{U} = 50 = QL\omega S = Q \times 200 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 800\,000 \times \frac{2}{1\,000}$$

d'où : $Q = 25$; la résistance R_5 double, en apparence, la résistance du circuit CL; on a (relation 16-III) :

$$R_g = \frac{L^2\omega^2}{20} = 5\,048$$

Une diminution de R_g augmente l'amplification et réduit la bande passante.

2. ***Couplage à résonance en H.F.*** — *On considère l'amplificateur à haute fréquence d'un récepteur pour ondes moyennes, monté comme l'indique la figure* 15.

L'aérien est un cadre formé de 12 *spires en série; les spires sont rectangulaires. Les dimensions des côtés sont respectivement* 1,25 *m et* 0,80 *m.*

On reçoit une onde dont la pulsation est : $\omega = 2\,000\,000$. *Le champ de cette onde est* $F = 20$ *microvolts par mètre. Pour cette onde la surtension du cadre est* $Q = 100$.

Les caractéristiques de la première lampe sont :

$K = 15$ $\qquad r = 10\,000$ ohms

Le circuit bouchon intercalé sur la plaque de cette lampe a, pour la fréquence de l'onde incidente, une impédence $R_1 = 20\,000$ *ohms et une surtension* $Q_1 = 100$.

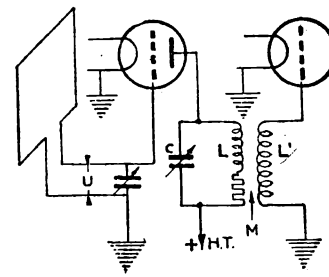


FIG. 15.

Le coefficient d'induction mutuelle entre la self de ce circuit et la self de grille de la deuxième lampe est $M = 100$ *microhenrys.*

1° *Calculer les tensions alternatives sur les grilles des deux lampes et sur la plaque de la première.*

2° *Un brouilleur dont la pulsation est égale à* $\omega' = 2\,200\,000$, *et qui est situé dans la même direction que le poste à recevoir produit un champ égal à celui de ce dernier. Calculer la tension produite par le brouilleur sur la grille de la première lampe, le récepteur étant resté accordé sur l'onde initiale.*

Paris, janvier 1937.

SOLUTION.

1° Hauteur effective du cadre (formule [4-VIII]) = 8 cm. F.é.m. induite dans le cadre : $E = h_r F = 0{,}08 \times 20 = 1{,}6$ μV.

Tension aux bornes du condensateur du cadre :

$$U = QE = 160 \ \mu V.$$

D'où le courant sinusoïdal de plaque :

$$I_1 = \frac{KU}{r + R_1} = \frac{15 \times 160}{30\,000} \mu A., \text{ soit : } \frac{8}{100} \mu A.$$

et la tension aux bornes du circuit bouchon :

$$R_1 I_1 = 15 \times 160 \frac{20\,000}{30\,000} = 1\,600 \ \mu V.$$

D'autre part le courant dans L est :

$$I_L = QI_1 = 8 \ \mu A.$$

La f.é.m. induite dans L′ est :

$$V_0 = M\omega I_L = \frac{100}{10^6} \times 2 \times 10^6 \times 8 = 1\,600 \ \mu V.$$

2° La tension U′ recueillie par la pulsation ω' est telle que :

$$\frac{U}{U'} = \sqrt{1 + \theta^2 (\Delta\omega)^2}$$

où : θ = constante de temps $= \frac{2L}{R} = \frac{2 \times 200 \times 10^{-6}}{2}$ soit : 200 μ/sec.

et : $$\Delta\omega = (\omega' - \omega) = 200\,000 \ ;$$

on en déduit :

$$\frac{U}{U'} = \sqrt{1 + \left(200 \times \frac{200\,000}{2 \times 10^6}\right)^2}$$ soit 20 environ

et : $$U' = \frac{U}{20} = 8 \ \mu V.$$

---

3. QUESTION DE COURS. — *Couplage lâche de deux circuits; oscillations forcées. Courbes de résonance; synchronisme entre un poste d'émission et un poste de réception.*

Couplage à résonance en H.F. (circuit simple).

1° *On considère un circuit oscillant composé d'une self L_1 fixe et d'une capacité C variable; $L_1 = 1$ μH. Quelle est la valeur C_1 à donner à C pour que le circuit oscillant soit accordé sur une fréquence* f *de* 10^7 *cycles/seconde.*

2° *Sachant que la valeur maxima que peut prendre C est égale à* 4 C_1 *et que la capacité résiduelle est égale à* $\frac{1}{10}$ *de la capacité maxima, quelle est la gamme des longueurs d'onde sur laquelle on peut réaliser l'accord ?*

3° *Pour le circuit oscillant ci-dessus accordé sur* $\lambda = 30$ *mètres, la résistance interne du circuit est* $R = 0{,}5$ *ohm.*

Ce circuit oscillant est mis en série dans le circuit plaque d'une lampe amplificatrice à trois électrodes pour laquelle $r = 16\,000$ *ohms et* $K = 12$. *Quelle est l'amplitude de la d.d.p. alternative disponible entre les bornes A et B du circuit oscillant lorsqu'on applique sur la grille une d.d.p.*

alternative d'amplitude 1,2 *volts et dont la fréquence est la fréquence d'accord du circuit oscillant ?*

4° a) *Que devient la d.d.p. disponible entre les bornes A et B dans les conditions du* 3°, *mais une résistance de* 1,5 *ohm supplémentaire étant mise en série dans le circuit oscillant ?*

b) *Quelle résistance conviendrait-il de mettre en série dans le circuit plaque de la lampe pour obtenir le même résultat sans introduire dans le circuit oscillant la résistance de* 1,5 *ohms ?*

Le Havre, juillet 1937.

SOLUTION.

1° $C_1 = \frac{1}{4}$ mμF.

2° Pour $C = \frac{1}{4}$ mμF., $\lambda_1 = 30$ mètres; une capacité $4C_1$ donne une longueur d'onde $\sqrt{4} \times \lambda_1 = 60$ mètres et une capacité de $\frac{4C_1}{10}$ une longueur d'onde $\frac{60}{\sqrt{10}} = 19$ mètres.

3° $$\frac{L}{CR} = \frac{10^{-6}}{\frac{1}{4} \times 10^{-9} \times 0{,}5} = 8\,000\ \Omega.$$

d'où : $$V = 12 \times 1{,}2 \times \frac{8\,000}{24\,000} = 4{,}8\ \text{V}.$$

4° *a*) La résistance équivalente au circuit bouchon accordé devient quatre fois plus petite (la résistance R passe de 0,5 à 2 ohms) soit : 2 000 Ω. La différence de potentiel aux bornes devient :

$$12 \times 1{,}2 \times \frac{2\,000}{18\,000} = 1{,}6\ \text{V}.$$

b) La résistance x cherchée est telle que :

$$1{,}6 = 12 \times 1{,}2 \times \frac{8\,000}{8\,000 + 16\,000 + x}$$

$$x = 48\,000 \text{ ohms}.$$

QUESTION DE COURS. — *Radiogoniométrie : exposer succinctement, mais clairement, sur quels principes elle est basée. Indiquer sans description d'appareils, comment elle est techniquement utilisée à bord des*

navires (il ne sera donc pas parlé de la réglementation). Qu'entend-on par compensation d'un cadre et comment la réalise-t-on ? (il ne sera pas parlé du système de lever du doute).

4. ***Couplage à résonance en H. F. (circuit simple).*** — Dans *un étage amplificateur, on utilise une lampe dont les caractéristiques sont :*

pouvoir amplificateur $K = 100$;

— résistance interne (en ohms) $r = 90\,000$.

Dans le circuit plaque de cette lampe est inséré un circuit bouchon comprenant :

— d'une part une bobine de self L présentant une résistance ohmique égale à R;

— d'autre part une capacité C égale à 1/1 000 *microfarad.*

Dans ces conditions, le circuit bouchon est accordé sur 600 *mètres de longueur d'onde et sa surtension Q est alors égale à* 300.

Sur la grille de la lampe est appliqué un signal, de fréquence égale à 100 *kc/s et dont la tension efficace U est égale à* 100 *millivolts.*

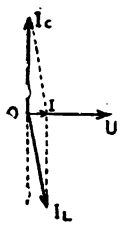


FIG. 16.

1° *Calculer les valeurs de R et de L.*

2° *Déterminer la tension efficace haute fréquence V qui existe entre les points A et B sous l'influence du signal appliqué à la grille* (fig. 6).

3° I_L, I_C *et* I *étant respectivement les valeurs efficaces des courants qui, sous l'influence du signal appliqué à la grille, parcourent :*

— la branche « bobine » du circuit bouchon,

— la branche « capacité » du circuit bouchon,

— l'intervalle filament-plaque de la lampe,

calculer les valeurs de I_C, I_L *et* I *et tracer le diagramme vectoriel représentant la relation qui les unit.*

4° *Le signal appliqué à la grille est en réalité obtenu en recevant à* 5 *km, sur un cadre accordé comprenant* 10 *spires carrées de* 1 *m de côté et présentant une surtension égale à* 100, *l'émission d'un poste travaillant sur* 600 *mètres de longueur d'onde avec une intensité efficace, à la base de son antenne, égale à* 5 *ampères. Calculer la hauteur effective de l'antenne de ce poste.*

NOTA. — *Pour la simplicité des calculs, on prendra* $\pi = 3$.

Paris, Avril 37.

SOLUTION.

1° $L = 100$ µHs.

$$R = \frac{L\omega}{Q} = \frac{10^{-4} \times 2\pi \times 500\,000}{300} \text{ soit : } 2 \text{ ohms.}$$

2° $$\frac{L}{CR} = 50\,000\ \Omega.$$

$$V = 100^2 \times \frac{50\,000}{140\,000} = 3570\ \text{mV}.$$

3° $$I_C = I_L = \frac{35\,70}{L\omega} = 11{,}4\ \text{mA}.$$

$$I = \frac{100^2}{140\,000}\ \text{soit :}\ 71\ \mu\text{A}.$$

Voir, pour le diagramme, la figure 16 : I_C et I_L sont presque en opposition de phase; I est en phase avec la tension de grille U.

4° f.é.m. induite dans le cadre : $E = 1$ mV. — Hauteur effective du cadre :

$$h_r = 2\pi \frac{10^5}{6 \times 10^4}\ \text{soit :}\ 10\ \text{cms}.$$

champ électrique agissant :

$$F = \frac{E}{h_r}\ \text{soit :}\ \frac{1}{10^4}\ \text{V/cm}.$$

d'où la hauteur effective h_e du poste émetteur :

$$\frac{1}{10^4} = 120\,\pi \times \frac{h_e \times 5}{60\,000 \times 500\,000}\ \text{soit :}\ h_e = 33{,}3\ \text{m}.$$

QUESTION DE COURS. — Radiotéléphonie.

a) *Qu'appelle-t-on : onde porteuse, taux de modulation, bandes latérales ?*

b) *Faire le schéma d'un émetteur en radiotéléphonie (seul le schéma est demandé) commandé à distance.*

6. PROBLÈME. — *Un cadre sert à alimenter l'étage d'amplification* HF *d'un récepteur :*

Onde à recevoir..... $\lambda = 1\,000$ *m.*
Surface totale du cadre..... $nS = 100$ *m²*.
Self du cadre..... $L = 100$ *microhenrys.*
Résistance du cadre..... $R = 1$ *ohm.*
Champ à recevoir..... $F = 1$ *millivolt par mètre.*
Inclinaison du plan du cadre sur la direction d'où vient l'onde..... $= 60°$.

Coefficient d'amplification de la lampe.... $K = 40$.
Résistance interne..... $= 20\,000$ *ohms.*
Impédance du circuit bouchon sur la plaque $Z = 20\,000$ *ohms.*

On demande :

1° *La tension U aux bornes du cadre;*

2° *La tension V aux bornes du circuit bouchon sur la plaque.*

Nantes, 1939.

SOLUTION.

1° Hauteur effective du cadre pour l'inclinaison indiquée :

$$62{,}8 \cos 60° = 31{,}4 \text{ cm.}$$

Surtension : $Q = 188$ $U = 0{,}314 \times 188 = 60$ mV.

2° $V = 1\,200$ mV.

QUESTION DE COURS : *Propagation des ondes électromagnétiques à la surface de la terre suivant leur fréquence.*

7. PROBLÈME. — *On considère une triode dont la résistance interne r est égale à* 20 000 *ohms et la pente à* 1 *mA/V. Dans son circuit plaque est un circuit oscillant accordé sur la fréquence* 1 000 *kc/s. Sa self-induction est égale à* 100 *µHs et son coefficient de surtension* Q *à* 100.

A la grille est appliquée une tension d'amplitude égale à 1 *mV et de fréquence égale à* 1 000 *kc/s.*

On demande :

1. *Valeur du condensateur d'accord du circuit oscillant ?*

2. *Valeur de la tension V recueillie aux bornes du circuit oscillant ?*

3. *Valeur de la tension recueillie aux bornes du circuit oscillant s'il est shunté par une résistance de* 50 000 *ohms ?*

4. *Valeur de la tension recueillie aux bornes du circuit oscillant si la fréquence de la tension appliquée à la grille devient égale à* 2 000 *kc/s sans que soient changées les autres données ?*

Marseille, 1942.

SOLUTION.

1° $$C = \frac{1}{4} \text{ m}\mu\text{F.}$$

2° $K = 20\,000 \times \frac{1}{1\,000} = 20$; $L\omega = 628$; $QL\omega = 62\,800$ ohms

$$V = 15{,}2 \text{ mV.}$$

3° Résistance du circuit : $\frac{L\omega}{Q} = 6{,}28$ ohms.

Accroissement apparent de la résistance dû au shunt :

$$\frac{L^2\,\omega^2}{50\,000} = 7{,}9 \text{ ohms.}$$

Coefficient de surtension apparent du circuit :

$$\frac{628}{6{,}28 + 7{,}9} = 44.$$

Tension de sortie : $V = 11{,}6$ mV.

4° Avec : $\omega = 2\pi \times 2 \times 10^6$, on a : $L\omega = 1\,256$ ohms;

$$\frac{1}{C\omega} = 314 \text{ ohms.}$$

QUESTION DE COURS. — *Schéma simple d'une lampe triode montée en oscillatrice. Explication qualitative du fonctionnement. Relation de phase entre les tensions de grille et de plaque. Condition d'entretien dans le cas envisagé.*

Remarque. — *La réponse à cette question ne devra pas excéder trois pages d'écriture normale.*

8. PROBLÈME. — *Un étage H.F. d'un récepteur comporte sur la grille de la lampe un circuit oscillant accordé sur l'onde de 600 mètres. Sur la plaque se trouve une résistance* $R = 20\,000$ *ohms.*

L'antenne induit dans le circuit oscillant une force électromotrice de 2 000 *microvolts.*

Le condensateur d'accord du circuit a une valeur de 250 *p.F. et la résistance de la bobine est de* 10 *ohms.*

Calculez :

1° *la valeur de la self d'accord* L;

2° *la tension alternative* H.F. *sur la grille;*

3° *la tension alternative* H.F. *sur la plaque.*

Les caractéristiques de la lampe sont :
pouvoir amplificateur $K = 15$;
résistance interne $r = 10\,000$ *ohms.*

Paris, 1940.

SOLUTION.

1° $L = 400\ \mu Hs.$

2° Coefficient de surtension du circuit oscillant de grille : $Q = 125,6$. Tension sur la grille : $2 \times 125,6 = 251,2$ mV.

3° Tension de sortie : 2,512 volts.

---

9. PROBLÈME. — *Un récepteur accordé sur 375 kc/s est alimenté par un cadre formé de 20 spires ayant chacune une surface de 2 mètres carrés. Ce cadre est accordé par un condensateur variable. La surtension du circuit ainsi constitué est égale à 50.*

La tension recueillie aux bornes du condensateur est appliquée sur la grille d'une lampe pentode utilisée en amplificatrice et dont la pente est de 0,8 milliampère par volt. Sur la plaque de cette même lampe se trouve un circuit accordé dont l'impédance est de 20 000 ohms.

Le champ de l'onde à recevoir est de 0,5 millivolt par mètre.

1° *Le cadre étant dans la position où il capte le maximum d'énergie de l'onde incidente, calculez la tension alternative haute fréquence aux bornes du circuit plaque.*

2° *On place le cadre dans la position où est réduite au minimum l'action d'un brouilleur dont la direction fait un angle de 60° avec celle du poste à recevoir. Calculez dans ce cas les tensions alternatives haute fréquence sur la grille et aux bornes du circuit plaque.*

QUESTION DE COURS. — *Schéma d'une lampe à 2 électrodes montée en détectrice. Principe du fonctionnement. Rôle et nécessité d'un circuit à constante de temps. Comment choisit-on la valeur de la constante de temps dans le cas de la radiotélégraphie à onde entretenue pure et dans le cas de la radiotéléphonie ?*

Paris, octobre 1945.

SOLUTION.

1° Hauteur effective du cadre :

$$h_r = 2\pi \times \frac{20 \times 2 \times 10^4}{8 \times 10^4} = 31,4 \text{ cm} \quad (\lambda = 800 \text{ m.}).$$

F.é.m. dans le cadre : $E = 0,5 \times 0,314 = 0,157$ mV.

Tension aux bornes du condensateur :

$$U = QE = 50 \times 0,157 = 7,85 \text{ mV.}$$

Courant plaque du signal :

$$I_1 = SU = \frac{0{,}8}{1\,000} \times \frac{7{,}85}{1\,000} \text{ A soit : } 6{,}28 \ \mu\text{A.}$$

Tension de sortie : $R_0 I_1 = 20\,000 \times 6{,}28 \ \mu\text{V}$ soit : 125,6 mV.

Amplification :

$$\frac{125{,}6}{7{,}85} \text{ soit } 16.$$

2° Le plan des spires perpendiculaires à la direction du brouilleur fait un angle de 30° avec la direction de l'émetteur; les tensions U et V, multipliées par $\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}86$, deviennent respectivement : 6,75 mV et 111,2 mV.

---

10. PROBLÈME (fig. 17). — *Un cadre circulaire est composé de 20 spires de diamètre égal à 30 cm. Sa résistance est de 3 ohms. Au moyen d'un condensateur* $C_1 = \frac{1}{10\,000} \mu F$, *il est accordé sur 1 000 kc/s. Au moyen d'une inductance l de valeur négligeable il est couplé à un circuit oscillant accordé sur 1 000 kc/s également.*

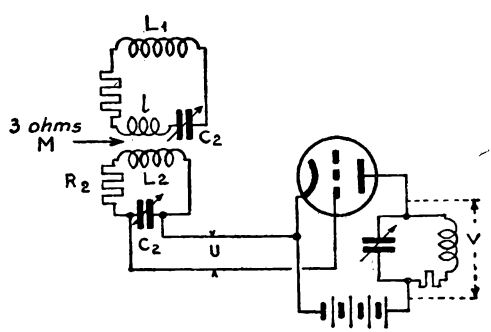


FIG. 17.

Les valeurs caractéristiques de ce circuit sont :

Self-induction ..... $L_2 = 200 \ \mu\text{H/s.}$
Coefficient de surtension..... $Q_2 = 50.$
Coefficient d'induction mutuelle entre l et L $M = 1 \ \mu\text{H.}$

Le cadre reçoit un champ électromagnétique de fréquence égale à 1 000 kc/s et de valeur égale à 100 μV/m.

On demande :

1° *Valeur de la self-induction du cadre ?*

2° *Valeur de la tension H.F. aux bornes du circuit oscillant ?*

On négligera dans les calculs la réaction du circuit oscillant sur le cadre, qui sera considérée comme nulle.

II. — *Le circuit oscillant est connecté à la grille d'une lampe dont les caractéristiques sont :*

Coefficient d'amplification..... $K = 50$
Résistance interne ..... $r = 300\,000$ ohms.

Dans son circuit anodique est inséré un circuit oscillant identique au premier. Quelle est la tension H.F. recueillie aux bornes de ce second circuit oscillant ?

QUESTION DE COURS. — *Définir les notions suivantes :*

Hauteur effective, résistance de rayonnement et rendement d'une antenne.

Indiquer les valeurs correspondantes pour des cas simples.

Paris, janvier 1945.

SOLUTION.

I. — 1° Self L_1 :

$$\lambda = 300 = 60\sqrt{0{,}1 \times L_1} \qquad L_1 = 250\ \mu H/s.$$

2° Surface d'une spire : $S = \dfrac{\pi \times 30^2}{4} = 706\ cm^2.$

Hauteur effective du cadre :

$$h_r = 2\pi \frac{20 \times 706}{3 \times 10^4} = 2{,}9\ cm.$$

F.é.m. induite dans le cadre :

$$E_1 = 100 \times 0{,}029 = 2{,}9\ \mu V.$$

Courant dans le cadre :

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1} = \frac{2{,}9}{3} \text{ soit environ } 1\ \mu A.$$

F.é.m. induite dans le secondaire :

$$E_2 = M\omega I_1 = 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6 \times 1 = 6{,}28\ \mu V.$$

Tension U :

$$U = Q_2E_2 = 6{,}28 \times 50 = 314 \ \mu V.$$

II. — Résistance du circuit bouchon inséré sur le circuit de plaque :

$$R_0 = Q_2L_2\omega = 50 \times 200 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6 = 62\,800 \text{ ohms.}$$

Tension V recueillie : $V = 50 \times 314 \times \dfrac{62\,800}{362\,800} = 2\,670 \ \mu V.$

QUESTION DE COURS.

a) *Qu'est-ce qu'un circuit bouchon ?*

b) *Comment peut-on employer un circuit bouchon dans un étage amplificateur haute fréquence ?*

Faire un seul schéma en supposant appliquée directement sur la grille de la lampe une certaine tension H.F. à amplifier.

c) *Pour établir un étage amplificateur H.F. sur onde courte vaut-il mieux employer une triode ou une pentode ? Pourquoi ?*

11. PROBLÈME.

Soit F_0 la fréquence correspondant à une onde de 300 mètres.
Soit F_1 la fréquence correspondant à une onde de 600 mètres.

1° *Calculer F_0 et F_1.*

2° *On veut établir un circuit oscillant comportant une self fixe L et un condensateur variable C de capacité maxima C_M et de capacité minima C_m. Soit F la fréquence de résonance du circuit :*

Sachant que pour $C = C_M = \dfrac{0{,}4}{1\,000}$ de microfarad, on a $F = F_1$ (600 m) et que pour $C = C_m$ on a $F = F_0$ (300 m), on demande la valeur de L en millihenrys et de C_m en microfarad.

3° *On constitue avec la self L et la capacité C un circuit bouchon dont le schéma est indiqué à la figure* 18. *La résistance R (résistance ohmique de la bobine) vaut* 15 *ohms quel que soit F. Le circuit est réglé pour* 300 *mètres (F_0). Quelle est la valeur de l'impédance dont les bornes sont A et B pour la fréquence F_0.*

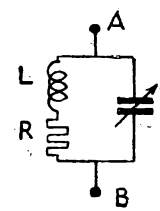


FIG. 18.

4° *On place le circuit bouchon dans le circuit plaque d'une pentode dont la caractéristique (courant plaque-tension grille) tracée pour une tension plaque de* 200 *volts est donnée à la figure* 19.

On constate expérimentalement que cette courbe est indépendante de la tension plaque. La grille de la lampe est polarisée à — 1,5 volt; on lui applique une tension alternative de fréquence F_0 et de tension efficace de 1 volt. La H.T. est de 200 volts. On demande :

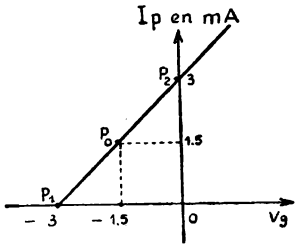


FIG. 19.

a) *le courant continu de plaque;*

b) *le courant alternatif efficace de plaque;*

c) *la tension alternative aux bornes du circuit bouchon;*

d) *le courant alternatif efficace passant dans la self L;*

e) *le courant alternatif efficace passant dans la capacité C.*

5° *Au lieu de 1 volt on applique maintenant 2 volts sur la grille; la tension alternative entre A et B est-elle doublée ? Pourquoi ?*

Paris, juillet 1945.

SOLUTION.

1° $F_0 = 1\,000$ kc/s. $\quad F_1 = 500$ kc/s.

2° On a : $600 = 60\sqrt{0{,}4 \times L} \qquad L = 250\ \mu\text{Hs}.$

$300 = 60\sqrt{C_m \times 250} \qquad C_m = 0{,}1\ \text{m}\mu\text{F}.$

3° $R_0 = \dfrac{L^2\omega^2}{R} = \dfrac{(250 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6)^2}{15}$ soit 164.850 ohms.

4° *a*) Le point de fonctionnement au repos est en P_0 correspondant à un courant :

$$I_{p_0} = 1{,}5 \text{ mA}.$$

b) La pente de la lampe est : $S = \dfrac{OP_2}{OP_1}$ soit 1 m.A/V.

d'où : la valeur *efficace* du courant de plaque :

$$I_1 = SU = 1 \text{ mA}.$$

c) La tension aux bornes du circuit bouchon :

$$V = R_0 I_1 = \frac{164\,850}{1\,000} = 164{,}85 \text{ volts}.$$

d) Les courants dans le circuit bouchon :

$$I_C = I_L = \frac{V}{L\omega} = \frac{164{,}85}{250 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 10^6} = 0{,}105 \text{ A}.$$

A noter que le coefficient de surtension Q du circuit est :

$$Q = \frac{L\omega}{15} = 105$$

et : $$I_C = I_L = QI_1 = 105 \text{ mA.}$$

5° Pour une *amplitude* de signal de grille égale à $\sqrt{2} = 1{,}41$ volt, le potentiel de la grille oscille entre $(-1{,}5 - 1{,}41) = -2{,}91$ volts et $(-1{,}5 + 1{,}41) = -0{,}09$ volt; le point de fonctionnement oscille (fig. 20) entre les positions P'_1 et P'_2 comprises sur la portion rectiligne P_1P_2 : il se superpose au courant I_{p0} le courant sinusoïdal I_1, d'*amplitude* égale à : 1,41 mA. Pour une amplitude de signal égale à $2\sqrt{2} = 2{,}82$ volts, le potentiel de la grille oscille entre $(-1{,}5 - 2{,}82) = -4{,}32$ volts et $(-1{,}5 + 2{,}82) = 1{,}32$ volt; le point de fonctionnement dépasse les positions extrêmes P_1 et P_2 (fig. 21); pour les potentiels de la grille compris entre -3 et $-4{,}32$ volts, le courant de plaque est nul; le point de fonctionnement se déplace de P_1'' vers P_1 pour monter à P_2'' et redescendre en P_1 et P_1'' ; le courant de plaque est *alternatif* mais non pas sinusoïdal et la tension de fréquence 10^6 ne double point.

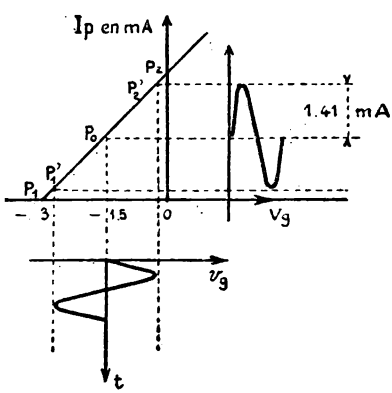


FIG. 20.

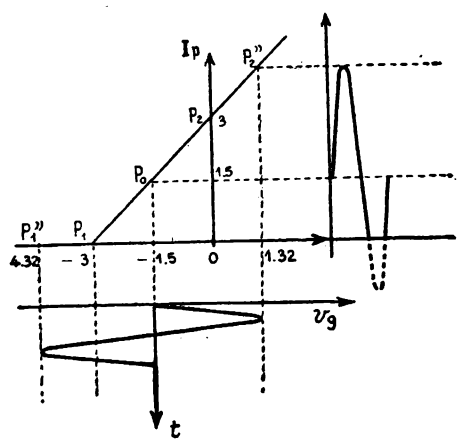


FIG. 21.

12. PROBLÈME. — *Un cadre circulaire est accordé sur l'onde de 600 m. Il comprend 10 spires de 2 m de diamètre. Sa self-induction est de 0,5 millihenry.*

1° *Quelle est la valeur de la capacité du condensateur d'accord ?*

2° *La valeur du champ H.F. reçu est de F = 300 microvolts/mètre.*

Le cadre ayant une résistance de 6 ohms, quelle sera la valeur de la tension H.F. recueillie à l'entrée du récepteur au maximum de réception ?

3° *Dans le voisinage du cadre se trouve une antenne réceptrice accordée sur 600 m. Sa hauteur effective est de 30 m, sa résistance ohmique négligeable. A quelle distance faudra-t-il en placer le cadre, pour que la perturbation causée par cette antenne soit inférieure à 15 microvolts par mètre ?*

On rappelle la formule [3-VII].

Paris, avril 1939.

SOLUTION.

1° $C = 0{,}2$ mμF.

2° Hauteur effective du cadre $h_r = 32$ cm;

f.é.m. dans le cadre : $h_r \times F = 300 \times 0{,}32 = 96$ μV;

courant dans le cadre : $I = \frac{96}{6} = 16$ μA;

tension aux bornes :

$$U = L\omega I = 500 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 500\,000 \times 96 = 25\,176 \ \mu V.$$

3° La résistance de rayonnement de l'antenne est :

$$R_r = 160\,\pi^2 \left(\frac{30}{600}\right)^2 = 4 \text{ ohms.}$$

F.é.m. induite dans l'antenne : $30 \times 300 = 9\,000$ μV.

Courant dans l'antenne :

$$\frac{9\,000}{R_r} = \frac{9\,000}{4} = 2\,250\ \mu A.$$

La distance r est telle que (relation [3-VII]) :

$$15 \times 10^{-6} = 120\,\pi \times \frac{3\,000 \times 2\,250 \times 10^{-6}}{60\,000\,r} \qquad r = 1\,570 \text{ cm.}$$

CHAPITRE XI

AMPLIFICATION A BASSE FRÉQUENCE DANS LES RÉCEPTEURS. — LAMPE GÉNÉRATRICE D'OSCILLATIONS. — DÉTECTION. — CHANGEMENT DE FRÉQUENCE.

I. — *Amplification à B. F.*

Conditions à réaliser :

1° *En télégraphie.* — Amplification maxima sur la fréquence unique à amplifier.

2° *En téléphonie.* — a) *Fidélité en fréquence.* L'amplification $\frac{V}{U}$ doit peu varier dans l'étendue des fréquences utiles (250 à 3 000 en téléphonie commerciale).

b) *Fidélité en amplitude.* Une tension *sinusoïdale* U de pulsation Ω (fréquence 800 par exemple) donne une tension de sortie *non sinusoïdale* faite de composantes V_1, V_2, V_3, etc., de pulsations Ω, 2Ω, 3Ω, etc. : il y a *distorsion non linéaire* et le *taux de distorsion non linéaire,* défini comme le rapport de la valeur efficace des harmoniques indésirés (fréquences 2×800, 3×800, etc.) à la composante désirée (fréquence 800), doit être faible (inférieur à 5 %).

Origine des distorsions; modes de couplage utilisés.

1° La distorsion non linéaire apparaît lorsque le signal augmente et correspond à un déplacement du point de fonctionnement sur une portion de surface caractéristique qui ne peut être confondue avec un plan.

2° La distorsion de fréquence résulte de ce que le bloc de couplage est sensible aux variations de la fréquence; pour réduire au minimum cette sensibilité, on utilise les couplages par résistance et par transformateur.

3° *Couplage par résistance* (fig. 1). Même constitution théorique qu'en H.F.; mais la capacité C_2 est plus forte afin de transmettre à R_2 la tension recueillie aux bornes de R_1 ; il y a diminution de l'amplification :

— pour les fréquences basses (< 250 en téléphonie) pour lesquelles C_2 présente une réactance appréciable;

— pour les fréquences élevées ($> 3\,000$) pour lesquelles la capacité C_1

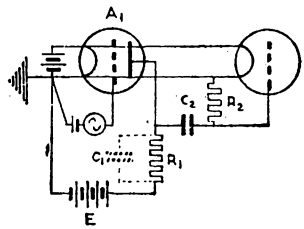


FIG. 1.

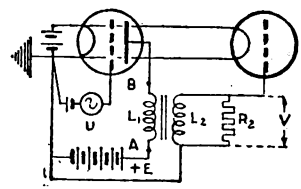


FIG. 2.

(capacité plaque filament + capacité des connexions) tend à former court-circuit.

4° *Couplage par transformateur* (fig. 10-X où l'ensemble L_1L_2 représente un transformateur à fer). Même théorie qu'en H.F.; le courant du signal est donné par (9-X) avec $\omega = \Omega$ (B.F.); mais en téléphonie la self L_1 est importante et r est négligeable vis-à-vis de $L_1\Omega$; d'où la tension aux bornes AB du primaire, soit KU, donnant aux bornes du secondaire une tension de sortie :

$$V = KU \times n \quad \{n = \text{rapport de transformation.} \qquad [1]$$

Dans quelques cas, le secondaire alimente une résistance R_2 (fig. 2); dans les conditions pratiques, l'ensemble pris entre A et B est équivalent à une résistance pure :

$$R = \frac{R_2}{n^2}. \qquad [2]$$

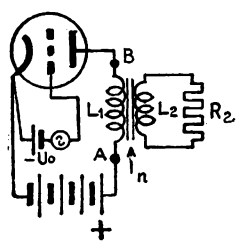


FIG. 3.

Alimentation d'un écouteur ou d'un haut-parleur (fig. 3). — La résistance R_2 de l'écouteur ou du haut-parleur étant faible vis-à-vis de r, on l'augmente en apparence en attaquant le haut-parleur par un transformateur et l'on réalise généralement la condition :

$$R = 2r \qquad (R \text{ donné par } [2]) \qquad [3]$$

Lampes utilisées en B.F. — Triodes ou pentodes B.F.

II. — *Lampe génératrice d'oscillations.*

Schéma de principe; conditions d'entretien (fig. 4). — La différence avec l'étage amplificateur de la figure (6-X) réside dans ce que la tension d'excitation de la grille est obtenue à partir de la f.é.m. $U = M\omega I_L$ induite dans L_1 par le courant I_L dans L ; au courant continu de plaque se superpose le courant donné à la figure (7-X); pour qu'il y ait *entretien des oscillations,* il faut :

— que M soit négatif (L et L_1 bobinés en sens inverses) ;

— que M ait une valeur *absolue* supérieure à la valeur d'accrochage donnée par la condition d'entretien :

$$KM = L + CRr \quad \begin{cases} \text{M et L en henry;} \\ \text{C en farad;} \\ \text{R et } r \text{ en ohms.} \end{cases} \qquad [4]$$

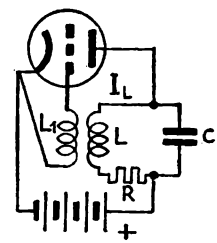


FIG. 4.

III. — *Détection. Le changement de fréquence*

Détection par triode ou pentode utilisée dans la partie courbe inférieure de la caractéristique du courant de plaque.

1° *Schéma de principe* (fig. 5).

2° *Fonctionnement :* a) *En l'absence de signal.* Grille polarisée négativement pour un réglage en classe B.

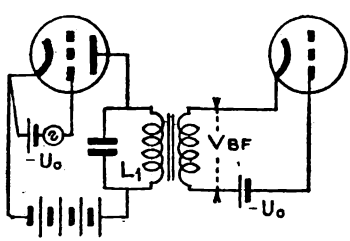


FIG. 5.

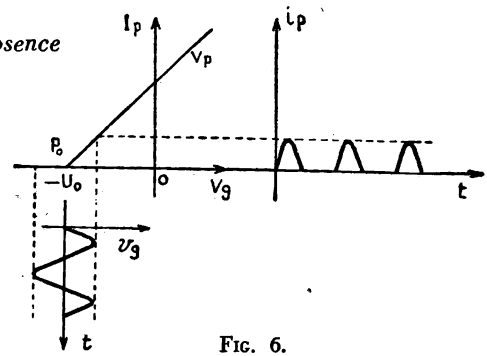


FIG. 6.

b) *Lors de l'arrivée d'une onde entretenue pure.* — Le courant de plaque est constitué (fig. 6) d'alternances redressées comportant une composante constante I_0 ; aucune action sensible sur un écouteur inséré sur le circuit de plaque.

c) *Lors de l'arrivée d'une onde entretenue modulée.* — Les alternances redressées du courant de plaque suivent les fluctuations de la modulation téléphonique.

3° *Facteurs de conversion.* Soit :

$$V_g = U(1 + M \sin \Omega t) \cos \omega t \qquad [5]$$

$$(\Omega = 2\pi \times 800 \text{ par exemple avec : } \omega = 2\pi \times 10^6)$$

le signal appliqué à la grille; le courant à B.F. (800) recueilli dans le circuit de plaque est égal au courant créé (fig. 7) par une f.é.m. :

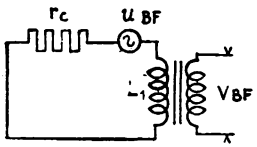


FIG. 7.

$$U_{BF} = K_c M U \sin \Omega t \qquad [6]$$

agissant sur une résistance r_c en série avec l'impédance Z de la charge de plaque, charge estimée pour la seule composante à B.F.; K_c, r_c et la *pente correspondante* $S_c = \frac{K_c}{r_c}$ *sont respectivement le pouvoir amplificateur de conversion, la résistance intérieure de conversion et la pente de conversion de la lampe.* Dans le cas d'une pentode (Z négligeable vis-à-vis de r_c) la composante à B.F. du courant de plaque a pour valeur efficace :

$$I_{BF} = S_c M \frac{U}{\sqrt{2}} \qquad [7]$$

donnant une tension de sortie :

$$V_{BF} = Z I_{BF}. \qquad [8]$$

Détection par diode.

1° *Schéma de principe* (fig. 8). — Le signal est pris aux bornes de C_0.

2° *Fonctionnement.* — a) *En l'absence de signal.* La grille est au potentiel zéro à travers R_g.

b) *Lors de l'arrivée d'un signal en porteuse,* une composante continue I_0 prend naissance à travers R_g dans le sens de la flèche donnant une polarisation négative de la plaque $-R_g I_0$; en pratique la constante de temps $C_g R_g$ est très supérieure à la période H.F. T_{HF} du signal :

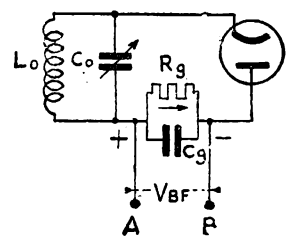


FIG. 8.

$$C_g R_g >> T_{HF} \qquad [9]$$

de telle sorte que, le condensateur C_g n'ayant pas le temps de subir une décharge appréciable entre deux charges consécutives, on recueille une polarisation négative de plaque $-V_0$ voisine de l'amplitude U du signal (polarisation $-\delta U$ ou δ, facteur d'efficacité, est compris entre 0,8 et 0,95).

c) *Lors de l'arrivée d'un signal modulé à une fréquence téléphonique* N_{BF} (*période* $T_{BF} = 1\,000$ *par exemple*), l'amplitude de la tension de polarisation négative de la plaque oscille entre $-\delta U\,(1 - M)$ (en creux de modulation) et $-\delta U\,(1 + M)$ (en crête de modulation) : on recueille ainsi aux bornes AB une composante de tension de fréquence N_{BF}; pour que cette tension moyenne suive avec fidélité les fluctuations de la modulation, il faut que la constante de temps $C_g R_g$ soit nettement inférieure à la période T_{BF} :

$$C_g R_g << T_{BF}. \qquad [10]$$

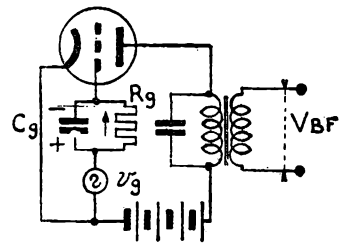


FIG. 9.

Détection par la grille (triode ou pentode).

1° *Schéma de principe* (fig. 9).

2° *Fonctionnement.* L'espace grille-filament joue le rôle de l'espace plaque-filament d'une diode et l'ensemble donne l'équivalent d'une diode détectrice associée à une diode amplificatrice à B.F. couplée par transformateur ou par résistance avec la lampe qui suit.

Le changement de fréquence.

1° La figure 10 donne le schéma de principe d'une lampe de changement de fréquence classique : la lampe comporte l'équivalent d'une triode et d'une hexode ayant la même cathode; la triode est faite (fig. 11) de

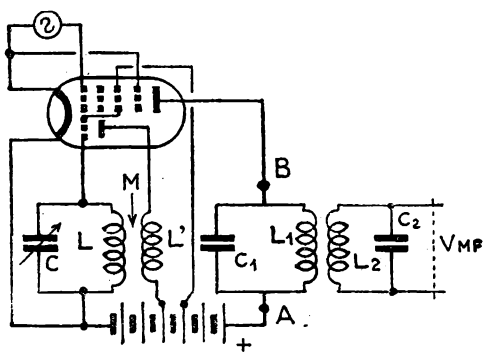


FIG. 10.

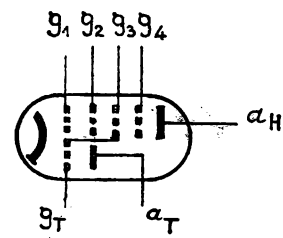


FIG. 11.

l'anode a_T et de la grille g_T réunie directement à la grille g_3 de la partie hexode.

2° *Fonctionnement.* — a) *En l'absence de signal : la triode donne,* par couplage entre l'anode a_T et le circuit CL, l'oscillation auxiliaire de fréquence N_2 directement transmise à g_3.

b) *Le signal* de fréquence porteuse N_1 modulé à la fréquence N_{BF} au taux M et appliqué (fig. 11) à la grille g_1 de l'hexode agit sur le courant de plaque de celle-ci, courant soumis à l'action modulatrice de la grille g_3 ; on recueille dans le circuit de plaque une composante de fréquence porteuse : $N_{MF} = |N_1 - N_2|$ modulée au taux M; cette composante présente, pour un signal donné par [5], une *amplitude* égale à l'amplitude du courant produit (fig. 12) par une f.é.m. :

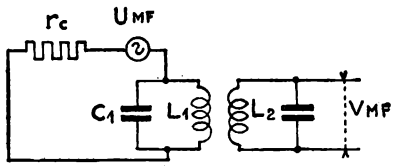


FIG. 12.

$$U_{MF} = K_c U (1 + M \sin \Omega t) \quad [11]$$

agissant sur la résistance r_c en série avec l'ensemble des deux circuits, C_1L_1 et C_2L_2 accordés sur N_{MF} et couplés légèrement au delà de la valeur critique pour former filtre de bande en téléphonie; K_c, r_c et la pente correspondante S_c sont les *facteurs de conversion de la lampe;* en pratique, le bloc des deux circuits de couplage présente une résistance faible par rapport à r_c ; d'où l'amplitude du courant à M.F. :

$$I_{MF} = S_c U (1 + M \sin \Omega t) ; \quad [12]$$

la différence de potentiel aux bornes A et B du bloc de couplage équivalant à une résistance R_0 pour la fréquence N_{MF} soit :

$$R_0 I_{MF}, \quad [13]$$

on en déduit les courants dans L_1 et L_2 et la tension de sortie V_{MF} modulée au taux M à la pulsation Ω; à noter (fig. 11) que g_2 est une grille écran et g_4 une grille d'arrêt des émissions secondaires de la plaque.

APPLICATIONS

QUESTION DE COURS. — *Courant modulé en amplitude : taux de modulation; puissance instantanée; puissance maxima et puissance moyenne en cours de modulation.*

1. PROBLÈME. ***Amplificateur à résistance.*** — 1° *On donne* (fig. 13) : $E = 300$ *V.* — *Courant plaque* $= 2$ *mA; courant écran* $= 0{,}5$ *mA;* $R = 50\,000\ \Omega$; *pot. écran masse* $= 100$ *V; pot. grille cathode* $= -3$ *V.*

Valeurs du potentiel de P par rapport à la masse et des résistances R et R_2.

2° *Valeur de la mesure de la différence de potentiel entre le point H et la masse donnée par un voltmètre de résistance* 2 *M*Ω.

3° *On applique à la grille une tension U de* 1 000 *c/s; valeurs à adopter pour les capacités* K_1 *et* D_2 *choisies de manière à présenter des réactances de valeurs respectives égales à* $\frac{1}{100}$ *des résistances* R_1 *et* R_2 *découplées.*

4° *Valeur instantanée maxima du potentiel au point P par rapport à la masse pour une tension* $U = \frac{1}{10} V$ *et 2 V; pente de la lampe 1,2 mA/V et résistance interne* $r = 1 M\Omega$.

Nantes, 1954.

SOLUTION :

1° La figure 13 porte les potentiels par rapport à la *cathode* de la lampe; la chute de potentiel dans $R = 100$ V; $R_1 = \frac{3\,000}{2{,}5} = 1\,200\ \Omega$;

$$R_2 = \frac{200\,000}{0{,}5} = 0{,}5\ M\Omega.$$

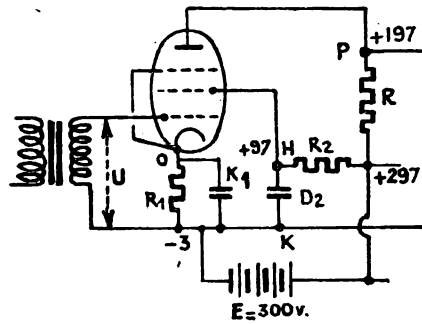


FIG. 13.

2° Il circule dans R_2 un courant supplémentaire qui traverse le voltmètre de 2 MΩ entre H et K, de valeur : $\frac{100}{2 \times 10^6}$ soit 0,05 mA; d'où la tension aux bornes de R_2 : $400\,000 \times \frac{0{,}55}{1\,000} = 220$ V, le potentiel de $H = 297 - 220 = 77$ V et la tension mesurée entre H et K = 80 V.

3° $C_1 = 13{,}4\ \mu F$; $D_2 = \frac{20}{1\,000}\ \mu F$.

4° $K = Sr = \frac{1{,}2}{1\,000} \times 10^6 = 1\,200$; la tension $KU = 1\,200 \times 0{,}1 = 120$ V se partage entre R et r proportionnellement à leurs valeurs; tension aux bornes de $R = 120 \times \frac{50\,000}{1\,050\,000} = 5{,}71$ V.

Pot. max. de P par rapport à la *masse* $= 300 + 5{,}71 \sqrt{2} = 308$ V et 461 V pour U = 2 V.

2. ***Amplification à B.F. par triode (couplage par transformateur).*** — 1° *On donne* (fig. 2) :

— $K = 32$ $r = 8\,000$ *ohms; fréquence* 1 000;

— $L_1 = 30$ *henrys; rapport de transformation du transformateur :*

$$n = 3 \qquad R_2 = \textit{infini}.$$

a) *Valeur de l'amplification;* b) *valeurs du courant de plaque et des tensions à l'entrée et à la sortie du transformateur pour un signal de grille :* $U = 0{,}1$ *volt ?*

c) *Comment se modifie l'amplification pour les fréquences basses et élevées ?*

2° *Mêmes données avec une résistance* $R_2 = 90\,000$ *ohms.*

a) *Valeur de la résistance équivalente prise entre les points A et B ?*

b) *Valeurs des courants primaire et secondaire et de la tension de sortie V pour un signal* $U = 0{,}1$ *volt ?*

SOLUTION.

1° *a)* $L_1\Omega = 30 \times 2\pi \times 1\,000 = 188\,500 >> r$

la tension KU se porte entre les points A et B donnant, à partir de [1], une amplification : $\frac{V}{U} = 32 \times 3 = 96.$

b) Courant de plaque $= \frac{KU}{L_1\Omega} = \frac{32 \times 0{,}1}{188\,500}$ soit 17 μA;

tension entre A et B $= KU = 3{,}2$ volts:

tension $V = 3{,}2 \times 3 = 9{,}6$ volts.

c) *Pour les fréquences basses, r* cesse d'être négligeable vis-à-vis de $L_1\Omega$: la tension entre A et B baisse, d'où une baisse de V et de l'amplification; pour les fréquences élevées, l'influence des capacités parasites et des fuites magnétiques du transformateur apparaît et donne une baisse d'amplification.

2° *Résistance entre A et B* (relation [2]) : $\frac{90\,000}{3^2} = 10\,000$ ohms.

Courant de plaque : $I_1 = \frac{32 \times 0{,}1}{8\,000 + 10\,000} =$ soit 0,18 mA.

Tension entre A et B : $\frac{0{,}18}{1\,000} \times 10\,000 = 1{,}8$ volt.

Tension V : $V = 3 \times 1{,}8 = 5{,}4$ volts.

Courant dans R_2 : $\frac{I_1}{n} =$ soit 0,06 mA.

3. *Alimentation d'un écouteur ou d'un haut-parleur par triode.*

1° Ecouteur. — a) *On donne* (fig. 3) :

— *les caractéristiques de la lampe :* $K = 20$ $r = 3\,000$ *ohms;*

— *la résistance de l'écouteur :* $R_2 = 500$ *ohms;*

on applique à la grille un signal de valeur : $U = 0{,}5$ *volt; l'écouteur étant directement inséré dans le circuit de plaque, calculer le courant de plaque* I_1 *et la puissance* P_u *fournie à l'écouteur.*

b) *Refaire les calculs, l'écouteur étant alimenté à partir d'un transformateur dont le rapport de transformation réponde à la relation* [3].

2° Haut-parleur électrodynamique. — *Mêmes questions, le haut-parleur ayant une résistance* $R_2 = 15$ *ohms.*

SOLUTION.

1° *a*) $$I_1 = \frac{20 \times 0{,}5}{3\,000 + 500} \text{ soit : } 2{,}85 \text{ mA.}$$

$$P_u = 500 \times \left(\frac{2{,}85}{1\,000}\right)^2 \text{ soit : } 4{,}06 \text{ milliwatts;}$$

cette puissance P_u est faible si l'on tient compte de la faible résistance R_2 vis-à-vis de r.

b) Le rapport n est tel que :

$$\frac{R_2}{n^2} = 2r \qquad n = \sqrt{\frac{R_2}{2r}} = \sqrt{\frac{500}{6\,000}} = \frac{1}{3{,}4};$$

c'est un transformateur abaisseur; d'où le nouveau courant de plaque :

$$I_1 = \frac{20 \times 0{,}5}{3\,000 + 6\,000} \text{ soit } 1{,}1 \text{ mA.}$$

$$P_u = 6\,000 \times \left(\frac{1{,}1}{1\,000}\right)^2 = 7{,}26 \text{ milliwatts.}$$

2° *a*) $$I_1 = \frac{20 \times 0{,}5}{3\,015} \text{ soit : } 3{,}3 \text{ mA.}$$

$$P_u = 15 \times \left(\frac{3{,}3}{1\,000}\right)^2 = \text{ soit } 0{,}163 \text{ milliwatt.}$$

b) $$n = \sqrt{\frac{15}{6\,000}} = \frac{1}{20}.$$

Mêmes valeurs pour I_1 et P_u qu'au (1° *b*).

4. ***Alimentation d'un haut-parleur par une pentode.*** — *On donne :*

— *la résistance du haut parleur :* $R_2 = 15$ *ohms.*

— *les caractéristiques de la pentode pour le point de fonctionnement choisi : pente* $S = 9$ *mA/V.*

$r = 50\,000$ *ohms.*

— *la valeur de la résistance de charge de plaque* $R = 7\,000$ *ohms;*

1° *Valeur du rapport de transformation n du transformateur d'adaptation du haut parleur ?*

2° *Valeurs du courant de plaque, du courant dans le haut parleur et de la puissance utile pour un signal appliqué à la grille de valeur* $U = 0{,}33$ *volt ?*

SOLUTION.

$$1^\circ\ n = \sqrt{\frac{R_2}{R}} = \sqrt{\frac{15}{7\,000}} = \frac{1}{21{,}6}.$$

2° Pouvoir amplificateur :

$$K = Sr = \frac{9}{1\,000} \times 50\,000 = 450.$$

Courant de plaque :

$$I_1 = \frac{KU}{R + r} = \frac{450 \times 0{,}33}{7\,000 + 50\,000} = 2{,}6 \text{ mA}.$$

Courant dans le haut-parleur :

$$I_2 = \frac{I_1}{n} = 66{,}6 \text{ mA}.$$

Puissance utile $= RI_1^2 = 7\,000 \times \frac{2{,}6^2}{10^6} = 47$ mW/s $= R_2 I_2^2$.

5. ***Passage d'un montage amplificateur à résonance à un montage oscillateur.*** — *On considère le montage amplificateur à résonance de la figure* (6-X) *comportant une lampe de caractéristiques* $K = 32$, $r = 8\,000$ *ohms ; on applique à la grille une tension sinusoïdale* $U = 0{,}94$ *volt, de fréquence* 500 *kc/s; le circuit oscillant de plaque comporte une self* $L = 200$ *μH/s de résistance* $R = 5$ *ohms :*

1° *Calculer les valeurs de la capacité d'accord C, du courant de plaque* I_1, *de la tension V aux bornes du circuit oscillant et du courant* I_L *dans ledit circuit; diagramme des vecteurs.*

2° *On désire réaliser la tension d'excitation de la grille (soit* 0,94 *volt) par induction mutuelle* (fig. 4) *avec une self de grille* L_1 *: valeur et signe de l'induction mutuelle convenable* M_c.

3° *Calculer directement* M_c *par application de la formule* (4).

SOLUTION.

1° $$C = \frac{0{,}5}{1\,000}\ \mu\text{F}.$$

Résistance équivalente au circuit bouchon accordé :

$$\frac{L^2\omega_0^2}{R} = QL\omega_0 = 125{,}6 \times 628 = 78\,900 \text{ ohms}$$

d'où : $$I_1 = \frac{32 \times 0{,}94}{8\,600 + 78\,900} \text{ A}.$$

soit : 0,345 mA.

$V = 78\,900\, I_1 = 27$ V. $\qquad I_L = QI_1 = 125{,}6 \times 0{,}345 = 43{,}3$ mA.

2° On a :

$$M_c\omega_0 I_L = M_c \times 2\pi \times 500\,000 \times \frac{43{,}3}{1\,000} = 0{,}94$$

d'où : $M_c = 6{,}87\ \mu Hs.$

3° On trouve la même valeur pour M_c.

QUESTION DE COURS. — *Circuit oscillant. — Période propre. — Formule de Thomson. — Amortissement.*

6. PROBLÈME. *Un émetteur de bord se compose d'un étage auto-oscillateur, d'un étage de puissance et d'une antenne suivant schéma de la figure 13.*

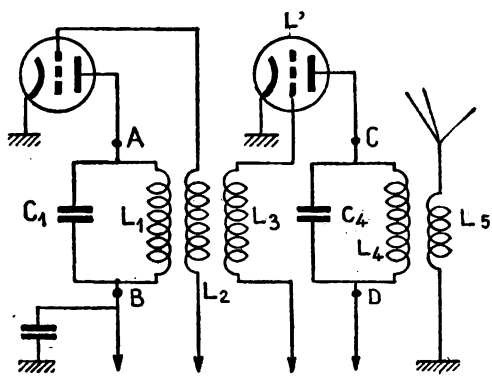


FIG. 13.

On donne les valeurs suivantes :

$$C_1 = 400\ cm$$

$$L_1 = L_2 = 0{,}25\ mH \qquad L_3 = 2{,}5\ mH.$$

La résistance R_1 *de la bobine* L_1 *connexions comprises est de* 50 ω. *La lampe* L *a pour caractéristiques :*

Résistance interne $r = 5\,000$ *ohms;*
Coefficient d'amplification $K = 7$.

I. — *La différence de potentiel entre* A *et* B *est de* 400 *volts efficaces* (*composante* H.F.).

On demande :

1° *Quel doit être le coefficient de couplage m entre* L_1 *et* L_2 *pour qu'il y ait production d'oscillations entretenues ?*

2° *Quelle est la longueur d'onde* λ *émise, en supposant que les oscillations aient lieu à la fréquence propre du circuit* $L_1 C_1$ *sans tenir compte de sa résistance ?*

3° *Quelle est la valeur efficace du courant de* H.F. *dans le circuit plaque (courant en* A*) et dans* L_1 *?*

II. — *On suppose en outre :*

a) *que le coefficient de couplage entre* L_1 *et* L_3 *est* $m' = 0{,}75$;

b) *que le circuit* L_4C_4 *ainsi que le circuit d'antenne sont accordés sur l'onde émise;*

c) *que la lampe* L′ *a pour caractéristiques :*

Résistance interne $r' = 3\,000$ *ohms,*
Coefficient d'amplification $K' = 6$,

et fonctionne sans courant grille;

d) *que l'antenne est constituée par un fil vertical de 15 mètres de hauteur effective;*

e) *que, pour la fréquence des ondes émises, l'impédance entre les extrémités* C *et* D *du circuit-plaque, compte tenu de la présence de l'antenne, est égale à une résistance pure* $R' = 6\,000$ *ohms;*

f) *que la résistance du circuit d'antenne, résistance de rayonnement non comprise, est de* 3 *ohms;*

g) *que les pertes dans le circuit* C_4L_4 *sont négligeables.*

Dans ces conditions, on demande :

1° *la tension* H.F. *efficace recueillie aux extrémités* C D *de la self de sortie;*

2° *le courant* H.F. *efficace dans l'antenne;*

3° *la puissance rayonnée et le rendement du circuit d'antenne.*

APPROXIMATION. — *On prendra* $\pi = \sqrt{10}$ *et on supposera qu'un centimètre est égal à* 1 $\mu\mu$F (10^{-12} *Farad*).

Marseille, 1943.

SOLUTION.

I. — 1° On déduit de [4] :

$$M = \frac{250 \times 10^{-6} + 400 \times 10^{-12} \times 50 \times 5\,000}{7} \text{ H}$$

soit : 50 μHs. $\qquad m = \dfrac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = 20\ \%$.

2° $\lambda = 600$ mètres.

3° $\dfrac{L_1^2\omega_0^2}{R_1} = 12\,350$ ohms.

Courant en A : $I_1 = \dfrac{400}{12\,350} = 0{,}032$ A.

II. — 1° Courant dans L_1 :

$$J_1 = \frac{400}{L.\omega_0} = 0{,}53 \text{ A.}$$

Induction mutuelle entre L_1 et L_3 :

$$M' = 0{,}75 \times \sqrt{250 \times 2\,500} = 580 \text{ µHs.}$$

Tension grille de L' : $M'\omega_0 J_1 = 964$ volts

Courant en C (courant de plaque) :

$$I'_1 = \frac{6 \times 964}{9\,000} = 0{,}64 \text{ A.}$$

Tension entre C et D : $0{,}64 \times 6\,000 = 3\,840$ volts.

2° Puissance livrée à l'antenne entre les points C et D :

$$P_a = 0{,}64 \times 3\,840 = 2\,460 \text{ watts.}$$

Résistance de rayonnement :

$$1\,600\left(\frac{15}{600}\right)^2 = 1 \text{ ohm.}$$

Résistance totale de l'antenne : 4 ohms.

Courant dans l'antenne :

$$I_a = \sqrt{\frac{2\,460}{4}} = 24{,}8 \text{ A.}$$

3° Rendement de l'antenne : 25 %.

---

7. PROBLÈME.

I. — *Un circuit oscillant se compose d'une self* L_0 *et d'un condensateur* C_0 *(fig. 14).*

1° *La self valant* $L_0 = 0{,}2$ *microhenry, quelle est en microfarad la*

valeur de C_0, *sachant que la longueur d'onde propre du circuit est de 16 mètres ?*

2° *Quelle est la résistance* R_0 *du bobinage* L_0, *sachant que le coefficient de surtension vaut dans ces conditions* $Q = 63$. *On néglige les pertes dues au condensateur.*

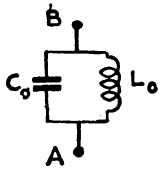


FIG. 14.

3° *Si l'on fait varier la capacité du condensateur de* + 2 % *autour de la valeur* C_0, *quelle est la variation relative de la fréquence propre autour de sa valeur initiale ?*

II. — *On utilise ce circuit pour constituer un oscillateur à triode (fig. 15).*

La lampe a pour résistance interne $r = 4000$ *ohms et pour coefficient d'amplification* $K = 40$.

Sachant que la self L_1 *de couplage est identique à* L_0, *pour quelles valeurs du coefficient de couplage m y a-t-il oscillation ?*

Quel est le sens du couplage ?

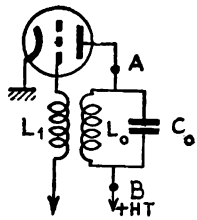


FIG. 15.

III. — *Le condensateur* C_0 *étant supposé à air, avec une distance entre armatures* $e = 0{,}314$ *mm, quelle serait sa surface ?*

De combien devrait varier l'écartement e pour obtenir la même variation de fréquence que ci-dessus au I, 3° ?

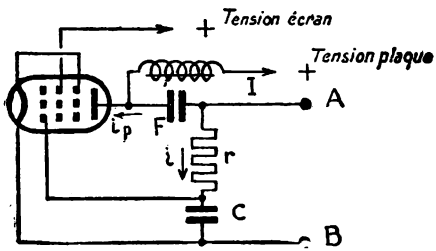


FIG. 16.

On ajoute entre les points A *et* B *du circuit oscillant le montage représenté par la figure 16.*

On suppose dans ce montage que la branche r dérive une fraction i du courant total I *qui est négligeable devant ce dernier et que la résistance pure r est grande devant la réactance du condensateur.*

De plus, la capacité de filtrage F *joue un rôle négligeable.*

On donne les valeurs :

$$r = 50\,000 \text{ ohms} \qquad C = 10\ pF.$$

La pentode P *fonctionne sans courant grille et son courant plaque* i_p *ne dépend que de la tension grille suivant la relation :*

$$i_p = S.u$$

où S *est la pente de la lampe, qui vaut* 10 *mA/v et u la tension du signal de grille.*

Etudier au moyen des équations ou d'un diagramme vectoriel, la relation entre le courant haute fréquence I *dans ce circuit et la tension haute fréquence* V *aux bornes de ce circuit. En déduire que le circuit* AB *équivaut sensiblement à une réactance :*

$$X = \frac{Cr\omega}{S}$$

que l'on évaluera en ohms et dont on indiquera si elle est capacitive ou selfique.

Quel est l'effet de cette réactance sur la fréquence propre du circuit oscillant monté entre A *et* B *?*

Paris, Avril 1946.

SOLUTION.

I. — 1° On a :

$$16 = 60\sqrt{0{,}2\,C_0} \qquad C_0 = \frac{0{,}355}{1\,000}\,\mu F.$$

2° $$\text{Fréquence} = \frac{3 \times 10^8}{16} = N_0$$

$$R_0 = \frac{L\omega}{R} = \frac{0{,}2 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 3 \times 10^8}{63 \times 16} = 0{,}375 \text{ ohm.}$$

3° Nous emploierons la méthode brutale :

$$N_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_0 L_0}};$$

nouvelle fréquence N pour une capacité égale à $1{,}02\,C_0$:

$$N = \frac{1}{2\pi\sqrt{1{,}02\,C_0 L_0}};$$

d'où, par division $$N = \frac{N_0}{\sqrt{1{,}02}}$$

et la diminution relative de la fréquence :

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = \frac{\sqrt{1{,}02} - 1}{1} = 1\,\%.$$

II. — La condition [4] donne :

$$40\,M = 0{,}2 \times 10^{-6} + 0{,}355 \times 10^{-9} \times 0{,}365 \times 4\,000,$$

soit : $M = 0{,}018\ \mu H.$

M doit être négatif; $m = \dfrac{0{,}018}{\sqrt{0{,}2 \times 0{,}2}} = 9\ \%$.

III. — On a, à partir de [12-I] :

$$0{,}355 \times 10^{-9} = \frac{1}{9 \times 10^{11}} \times \frac{S}{4\pi \times 0{,}0314}; \qquad S = 128\ cm^2.$$

La capacité C_0 correspond à une épaisseur e et la nouvelle capacité $1{,}02\ C_0$ à une épaisseur e'; ces capacités étant inversement proportionnelles aux épaisseurs (relation 12-I),

on a : $\dfrac{e}{e} = \dfrac{1}{1{,}02}$ et : $e - e' = e \times \dfrac{0{,}02}{1{,}02}$ soit : $\left(\dfrac{2}{100}\, e\right)$.

Le diagramme des vecteurs est donné à la figure 17 où la tension V est choisie comme origine des phases : la réactance de C étant négligeable vis-à-vis de r, le courant $i = \dfrac{V}{r}$ est représenté par le vecteur en phase Oi; la tension u aux bornes de C est en retard de $\dfrac{1}{4}$ période sur le courant i (vecteur Ou de longueur $u = \dfrac{i}{C\omega} = \dfrac{V}{Cr\omega}$) ; le courant de plaque $I = i_p$ est en phase avec la tension u (vecteur OI de longueur $I = Su = \dfrac{SV}{Cr\omega}$); la tension V et le courant I sont représentés par des vecteurs en quadrature; I est en retard et l'ensemble présente une réactance selfique :

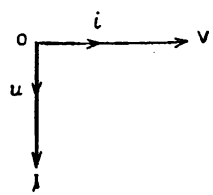


FIG. 17.

$$X = \frac{V}{I} = \frac{Cr\omega}{S} = \frac{10 \times 10^{-12} \times 50\,000 \times 2\pi \times 3 \times 10^8}{\dfrac{10}{1\,000} \times 16.} = 94\,200 \text{ ohms}$$

correspondant à une self :

$$L = \frac{Cr}{S} = 50\ \mu Hs.$$

Cette self, branchée en parallèle aux bornes de L_0, donne une très faible diminution de self; la self équivalente (relation 8 — I) est :

$$l = \frac{LL_0}{L + L_0} = \frac{50 \times 0{,}2}{50 + 0{,}2} = 0{,}1992\ \mu H.$$

Il y a léger accroissement de la fréquence de l'oscillateur.

8. — PROBLÈME. **Changement de fréquence.** *On considère un récepteur télégraphique à changement de fréquence. Ce récepteur comporte donc une amplification* H.F., *une amplification* M.F., *une amplification* B.F.

1° *Les étages d'amplification* H.F. *sont des étages à résonance; chaque circuit oscillant est constitué par une self* L *de 4 microhenrys et par un condensateur variable dont la valeur maxima* $C = \frac{0,25}{1\,000}$ *et la résiduelle* $\frac{1}{9}$ *de la capacité maxima.*

Quelle est, exprimée en kilocycles et en mètres, la gamme dans laquelle peut fonctionner le récepteur ?

2° *On suppose le récepteur accordé sur 30 mètres.*

a) *Quels sont, exprimés en fréquence, les réglages possibles de l'hétérodyne de changement de fréquence, si la M.F. du récepteur est de 500 kilocycles/seconde ?*

b) *Pour les réglages en question de l'hétérodyne de changement de fréquence, quelles sont respectivement les fréquences des postes émetteurs susceptibles d'être gênants, en cas de sélectivité H.F. insuffisante ?*

3° *L'un des étages de l'amplificateur basse fréquence est monté comme il est indiqué sur la figure 2. Une lampe triode, pour laquelle* $r = 10\,000$ *ohms et* $K = 10$, *attaque, par l'intermédiaire d'un transformateur, la grille de l'étage suivant. Ce transformateur a trois fois plus de spires au secondaire qu'au primaire. Le secondaire est fermé sur une résistance* R_2 *de 90 000 ohms placée en série dans le circuit grille de l'étage suivant.*

Les résistances internes de grille sont supposées infiniment grandes.

Si une tension alternative d'amplitude 0,02 volt est appliquée à la grille de la lampe considérée, quelle est la tension appliquée à la grille de la lampe suivante ?

Paris, 1935.

SOLUTION.

1° Longueur d'onde maxima : $60\sqrt{0,25 \times 4} = 60$ mètres.

Longueur d'onde minima : $60\sqrt{\frac{0,25}{9} \times 4} = 20$ mètres.

D'où la gamme couverte en fréquences : de 5 à 15 mégacycles/seconde.

2° La fréquence correspondant à la longueur d'onde de 30 mètres $= 10^7$ c/s.

a) Les deux fréquences de réglage de l'hétérodyne sont :

$$(10^7 - 500\,000) \text{ et } (10^7 + 500\,000).$$

b) Les émetteurs dont les fréquences sont respectivement comprises :
soit entre : $(10^7 + 500\,000 - 3\,000)$ et $(10^7 + 500\,000 + 3\,000)$,
soit entre : $(10^7 - 500\,000 - 3\,000)$ et $(10^7 - 500\,000 + 3\,000)$,
donnent, après le deuxième changement de fréquence, un courant audible de fréquence comprise entre zéro et 3 000.

3° Le rapport de transformation du transformateur étant $n = 3$, la résistance R_2 de 90 000 ohms vue entre les points A et B à travers le transformateur donne une résistance équivalente :

$$R_0 = \frac{R_2}{n^2} = \frac{90\,000}{9} = 10\,000 \text{ ohms.}$$

La tension $KU = 10 \times 0{,}02 = 0{,}2$ volt se partage à égalité entre la résistance intérieure et R_0; d'où la tension entre A et B, soit 0,1 volt et la tension aux bornes de R_2 appliquée à la grille de la deuxième lampe :

$$V = n \times 0{,}1 = 0{,}3 \text{ volt.}$$

On peut, à titre d'exercice, calculer le courant sinusoïdal de plaque :

$$I_1 = \frac{KU}{R_1 + r} = \frac{0{,}2}{20\,000} \text{ soit } 10\,\mu A$$

et le courant dans la résistance R_2 :

$$\frac{I_1}{n} = \frac{10}{3} = 3{,}3\,\mu A.$$

9. — ***Récepteur à changement de fréquence.*** — *Un récepteur à changement de fréquence dont la moyenne fréquence est réglée sur 472 kc/s reçoit une émission sur la fréquence de 8 345 kc/s.*

1° *Quelles sont les fréquences de réglage possibles de l'hétérodyne de changement de fréquence ?*

2° *L'émission reçue étant de type A1, le récepteur est muni d'une hétérodyne moyenne fréquence réglable.*

Quelles sont les fréquences de réglage possibles de cette deuxième hétérodyne pour que la tonalité reçue au casque ait une fréquence de 800 pps ?

Dans ce qui suit on supposera ces deux hétérodynes réglées sur les plus hautes des fréquences possibles.

3° *Les réglages restant inchangés, une nouvelle émission de type A1 est reçue au casque à la fréquence de 1 600 pps. La bande passante du filtre moyenne-fréquence ayant une largeur de 8 kc/s, on demande quelles sont les fréquences possibles de cette nouvelle émission. On supposera bonne la protection contre la fréquence-image.*

4° *Lorsqu'on règle la bande passante du filtre moyenne-fréquence à une largeur de 2 kc/s, la tonalité disparaît au casque. On demande la fréquence exacte de la nouvelle émission écoutée.*

QUESTION DE COURS. — *La stabilisation par quartz des fréquences radioélectriques. Nécessité et principe des étages multiplicateurs de fréquence.*

Bordeaux, Juin 1946.
(Durée 1 h. 30)

SOLUTION.

1° 8 817 kc/s et 7 873 kc/s.

2° 472 kc/s + 800 c/s.

et : 472 kc/s — 800 c/s.

3° Les deux hétérodynes sont respectivement accordées sur 8 817 kc/s et (472 kc/s + 800 c/s) ; le brouilleur présente en M.F. l'une ou l'autre des deux fréquences :

$$N_1 = (472\ \text{kc/s} + 800\ \text{c/s} - 1\,600\ \text{c/s}) = 472\ \text{kc/s} - 800\ \text{c/s}$$

$$N_2 = (472\ \text{kc/s} + 800\ \text{c/s} + 1\,600\ \text{c/s}) = 472\ \text{kc/s} + 2\,400\ \text{c/s} ;$$

le filtre à M.F. laissant passer les fréquences comprises entre (472 kc/s — 4 000 c/s) et (472 kc/s + 4 000 c/s), la moyenne fréquence du brouilleur peut être N_1 ou N_2 correspondant aux quatre hautes fréquences :

$$(8\,817\ \text{kc/s} - N_1) \qquad (8\,817\ \text{kc/s} + N_1)$$

$$(8\,817\ \text{kc/s} - N_2) \qquad (8\,817\ \text{kc/s} + N_2)$$

4° Le filtre laissant passer les fréquences comprises entre :

$$(472\ \text{kc/s} - 1\,060\ \text{c/s}) \quad \text{et} \quad (472\ \text{kc/s} + 1\,000\ \text{c/s}),$$

la M.F. du brouilleur est égale à N_2, car la fréquence N_1 serait encore reçue.

10. ***Détection par caractéristique de plaque*** (fig. 5). — On donne :

— *les facteurs de conversion de la lampe :*

$$K_c = 11 \qquad r_c = 20\,000\ \text{ohms};$$

— *l'amplitude de la porteuse modulée à 30 % sur la fréquence* **1 000** :

$$U = 0{,}5\ \text{volt};$$

— *la self primaire* L_1 *et le rapport de transformation n du transformateur :*

$$L_1 = 32 \text{ henrys} \qquad n = 2.$$

Calculer le courant de plaque à B.F. et la tension de sortie à B.F., soit V_{BF}.

SOLUTION.

la réactance $L_1\Omega = 32 \times 2\pi \times 1\,000$ est très supérieure à r_o

d'où :
$$I_{BF} = \frac{K_c MU}{L_1\Omega}$$

et la tension à B.F. aux bornes de L_1, soit :

$$K_c MU = 11 \times 0{,}3 \times 0{,}5 = 1{,}65 \text{ volt}$$

d'où la tension de sortie :

$$V_{BF} = 1{,}65 \times 2 = 3{,}30 \text{ volts ;}$$

lorsque l'on fait varier la pulsation Ω à B.F., il y a diminution de la tension V_{BF} pour les raisons exposées à propos de l'amplification B.F. par transformateur.

11. ***Détection par caractéristique de plaque*** (fig. 18). — *Une pentode montée en détectrice présente une pente de conversion :*

$$S_c = 0{,}4 \text{ mA/V;}$$

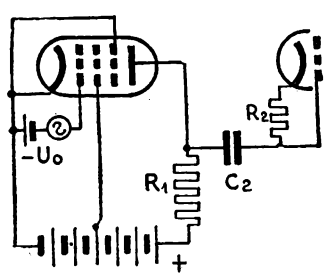


FIG. 18.

on donne, d'autre part, les éléments du couplage à résistance :

$R_1 = 0{,}3$ *mégohm;* $\quad R_2 = 0{,}7$ *mégohm;*

$$C_2 = \frac{10}{1\,000} \mu F ;$$

amplitude de la porteuse modulée à 30 % à la fréquence 1 000 :

$$U = 30 \text{ mV.}$$

Calculer le courant à B.F. I_{BF} *dans le circuit de plaque, la tension de sortie à B.F. aux bornes de* R_2.

SOLUTION.

On a (relation [7]) :

$$I_{BF} = \frac{0,4}{1\,000} \times 0,3 \times \frac{30}{1\,000} \text{ A.}$$

La réactance de C_2, soit $\frac{1}{C_2\Omega} = 16\,000$ ohms, est négligeable vis-à-vis de R_2 ; les résistances R_1 et R_2 en parallèle sont équivalentes à une résistance : $R = \frac{0,3 \times 0,7}{0,3 + 0,7} = 0,21$ mégohm;

d'où la tension de sortie à B.F. :

$$V_{BF} = 210\,000 \times I_{BF} = 0,78 \text{ V.}$$

Si l'on fait varier Ω, il y a baisse de V_{BF} pour les fréquences faibles et élevées pour les mêmes raisons exposées dans le couplage à résistance à B.F.

12. ***Etude d'un récepteur à trois lampes*** (fig. 19).

On considère un récepteur accordé sur l'onde de 10 000 *kc/s et composé d'un étage amplificateur haute fréquence équipé avec une pentode, d'un étage détecteur et d'un étage amplificateur B.F.*

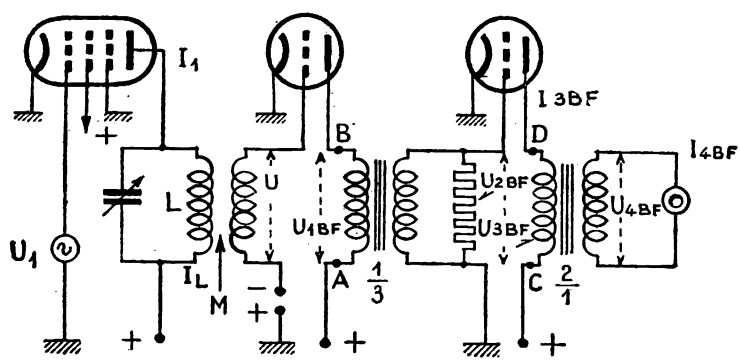


FIG. 19.

Sur la plaque de la lampe pentode se trouve un circuit oscillant composé d'un condensateur de capacité $C = 100$ *micro-microfarads et d'une self dont la surtension pour la fréquence indiquée est* $Q = 100$. *Cette self est couplée à une self située sur la grille de la détectrice. L'induction mutuelle entre les deux selfs est* $M = 1$ *microhenry.*

La détectrice est couplée à la lampe B.F. par un transformateur élévateur de rapport 1/3. Le secondaire de ce transformateur est fermé sur une résistance de charge de 90 000 ohms.

Sur la plaque de la lampe amplificatrice B.F. se trouve un transformateur abaisseur de rapport 2/1.

L'écouteur est branché aux bornes du secondaire. Sa résistance est de 4 000 ohms.

L'antenne induit aux bornes de la grille de la première lampe une tension de 7,85 millivolts, modulée au taux de 50 %.

Calculez les tensions alternatives H.F. sur la plaque de la première lampe et sur la grille de la détectrice, ainsi que les tensions alternatives B.F. sur la plaque de la détectrice, sur la grille et la plaque de l'amplificatrice B.F. ainsi qu'aux bornes de l'écouteur.

Les caractéristiques des lampes sont :

Pentode H.F..... { *pente : 0,8 milliampère par volt;* *résistance interne : 1 mégohm;*

Détectrice ..... { *pouvoir amplificateur de conversion : $K_c = 13$;* *résistance interne de conversion : $r_c = 30\,000$ ohms;*

Amplificatrice B.F. { *pouvoir amplificateur : $K = 40$;* *résistance interne : $r = 16\,000$ ohms.*

Paris, avril 1940.

SOLUTION.

1° $\lambda = 30$ mètres $\quad L = 2{,}5\ \mu H/s \quad L\omega = 157$ ohms.

Impédance du circuit bouchon $= QL\omega = 15\,700$ ohms.

$$I_1 = SU_1 = \frac{0{,}8}{1\,000} \times \frac{7{,}85}{1\,000} \text{ soit : } 6{,}30\ \mu A.$$

$$I_L = QI_1 = 630\ \mu A.$$

$$U_2 = M\omega I_L = 10^{-6} \times 2\pi \times 10^7 \times 630 = 39\,600\ \mu V.$$

2° *Détectrice.* F.é.m. B.F. de plaque :

$$K_c M U_2 = 13 \times 0{,}5 \times 39{,}6 = 257{,}4 \text{ mV.}$$

Impédance à B.F. prise entre A et B $= \dfrac{90\,000}{3^2} = 10\,000$ ohms.

Tension : $U_{1BF} = 257{,}4 \times \dfrac{10\,000}{30\,000 + 10\,000} = 64{,}3$ mV.

$$U_{2BF} = 64{,}3 \times 3 = 193 \text{ mV.}$$

3° *Amplificatrice à B.F.* Impédance à B.F. prise entre C et D :

$$\frac{4\,000}{\left(\frac{1}{2}\right)^2} = 16\,000 \text{ ohms.}$$

$$I_{BF} = \frac{40 \times 19{,}3}{16\,000 + 16\,000} \text{ mA. soit : } 241\ \mu\text{A}$$

Tension : $U_{3BF} = 241 \times 16\,000\ \mu\text{V}$. soit : 3,90 V.

$$U_{4BF} = \frac{3{,}90}{2} = 1{,}95 \text{ V.}$$

$$I_{4BF} = 2I_{1BF} = 482\ \mu\text{A.}$$

Puissance livree à l'écouteur : $4\,000 \times \left(\frac{482}{10^6}\right)^2$ W. soit : 0,92 mW.

13. ***Démodulation par diode.*** — *On donne* (fig. 8) :

Fréquence du signal : $N = 10^6$ $\quad L_0 = 100\ \mu\text{H/s.}$

$C_g = 100\ p\text{F.}$ $\quad R_g = \frac{2}{3}\,10^6$ ohms $\quad U = 5$ volts.

1° Fonctionnement en porteuse. a) *Valeurs de C_0 et de la polarisation négative approximative de la plaque;*

b) *Valeurs du courant continu I_0 dans R_g ; puissance P_p dissipée dans R_g ;*

2° Fonctionnement en modulation. $M = 30\ \%$ $\quad \Omega = 2\pi \times 1\,000.$

Variations en fonction du temps de la tension moyenne V_0 aux bornes de R_g.

SOLUTION.

1° *a*) $C_0 = 0{,}25\ \text{m}\mu\text{F.}$

[9] est réalisé puisque : $C_g R_g = 66\,T_{HF}$.

V_0 est pratiquement égal à 5 volts.

b) $I_0 = \frac{5}{\frac{2}{3} \times 10^6} = 7{,}5\ \mu\text{A.}$ $\quad P_p = 5 \times 7{,}5$ soit : 37,5 μW/s.

2° [10] est réalisé puisque : $C_g R_g = \frac{1}{15 \times 10^3}\text{sec.} << T_{BF}\left(\frac{1}{1\,000}\text{sec.}\right)$

La tension de polarisation négative a pour valeur pratique :

$$5\,(1 + 0{,}3 \sin \Omega t)\ ;$$

elle présente une composante à B.F. de valeur : $1{,}5 \sin \Omega t$ volt.

14. ***Démodulation par caractéristique de grille.*** — *Le montage détecteur de la figure 9 correspond aux données suivantes :*

$C_g = 100\ pF.$ $\qquad R_g = 5 \times 10^5$ ohms fréquence 500 kc/s.

1° Fonctionnement en l'absence de signal. *Le potentiel de la grille est nul et le courant de plaque égal à 10 mA par exemple.*

2° Fonctionnement lors de la réception d'une porteuse.

Soit : $U = 2$ volts l'amplitude de la porteuse; le facteur d'efficacité δ du détecteur est égal à 90 % :

a) *Valeur du potentiel moyen de la grille; expression de la tension de grille v_{gt} ?*

b) *Valeurs du courant continu et du courant H.F. de plaque ? On donne les caractéristiques de la lampe : $K = 13{,}8$ $\qquad r = 9\,500$ ohms.*

c) *Puissance P_p livrée au circuit de grille.*

3° Fonctionnement lors de la réception d'un signal modulé. *La tension prédéfinie est modulée à 30 % sur la fréquence 1 000; le transformateur de sortie présente un rapport de transformation égal à 3 :*

a) *Expression de la tension de la grille ?*

b) *Expression du courant continu, du courant de fréquence 1 000 et du courant H.F. dans le circuit de plaque; valeur du taux de conversion de la lampe ?*

SOLUTION.

1° *a*) Potentiel moyen de la grille $= -0{,}9$ U $= -1{,}8$ volt $= -V_0$.

$$v_{gt} = (-1{,}8 + 2\cos \omega t) \text{ volts.}$$

b) Le courant *continu* de plaque subit une diminution :

$$\Delta I_{p_0} = \frac{K}{r} \Delta V_g = -1{,}45 \times 1{,}8 \text{ mA} = -2{,}61 \text{ mA.}$$

et s'établit à : 7,39 mA.

c) $P_p = \dfrac{V_0^2}{R_g} = \dfrac{1{,}8^2}{5 \times 10^5}$ soit : 6,48 μW/s.

On vérifie facilement que les conditions [9] et [10] sont réalisées.

3° On a :

$$v_{gt} = -1{,}8\,(1 + 0{,}3 \sin \Omega t) + 2\,(1 + 0{,}3 \sin \Omega t) \cos \omega t.$$

b) La composante de courant continu reste la même qu'en régime de porteuse; la composante à B.F. est égale au courant produit (fig. 7) par

une f.é.m. ($-1{,}8 \times 0{,}3 \times 13{,}8 \sin \Omega t$) volts à B.F. agissant sur la résistance $r = 95\,000$ ohms en série avec le transformateur; le calcul est conforme à celui qui a été fait dans l'amplification B.F. par transformateur; la self L_1 étant choisie suffisamment élevée pour les fréquences téléphoniques pour que $L_1\Omega >> r$, on recueille à l'entrée du transformateur une tension *d'amplitude* $(1{,}8 \times 0{,}3 \times 13{,}8)$ volts $= 7{,}45$ volts et une tension de sortie : $V_{BF} = 7{,}45 \times 3 = 22{,}35$ volts.

15. ***Changement de fréquence par triode hexode*** (*fig. 10*). — *L'amplitude du signal appliqué à la première grille est :* $U = 5$ mV. *sur la fréquence de* 16 Mcs; *les circuits à* M.F., C_1L_1 *et* C_2L_2 *sont accordés sur* 472 *kc/s.*

1° *Fréquence de la triode oscillatrice ?*

2° *Le transformateur à M.F. sous blindage et à poudre de fer donne deux circuits à coefficients de surtension égaux à* 200; *l'impédance de chaque circuit* C_1L_1 *et* C_2L_2 *en régime d'antirésonance est égale à* 300 000 *ohms; déterminer les caractéristiques* (*self, capacité et résistance*) *de chaque circuit.*

3° *La pente de conversion de la lampe pour les alimentations données et, notamment, pour une amplitude* $U_2 = 8$ *volts de l'oscillation locale, est égale à* 0,3 mA/V; *calculer le courant de plaque à* M.F.

4° *Les deux circuits* C_1L_1 *et* C_2L_2 *sont réglés au couplage critique; valeur de l'induction mutuelle critique, de l'accroissement apparent de la résistance du primaire sous l'influence du secondaire accordé et de l'impédance du bloc de couplage pris entre* A *et* B *?*

3° *Valeurs de la tension à* M.F. *entre* A *et* B, *du courant dans* L_1, *dans* L_2 *et de la tension* M.F. *de sortie* U_2 *aux bornes de* C_2 ?

SOLUTION.

1° $16\ \text{Mc/s} \pm 472\ \text{kc/s}.$

2° On a :
$$\begin{cases} C_1L_1 = \dfrac{1}{(2\pi \times 472\,000)^2} \\ 300\,000 = QL_1\omega_0 = 200 \times L_1 \times 2\pi \times 472\,000 \\ R_1 = \dfrac{L_1\omega_0}{200} \end{cases}$$

d'où : $L_1 = L_2 = 530\ \mu\text{Hs}.$ $C_1 = C_2 =$ environ 200 *pF.*

$R_1 = R_2 = 7{,}5$ ohms.

3° $I_{MF} = 0{,}3 \times \dfrac{5}{1\,000}$ mA.

4° $M_c = \frac{7{,}5}{2\pi \times 472\,000}$ soit : 2,5 µ.H.s.

Accroissement apparent de résistance $= \frac{M^2\omega_0^2}{R_2} = R_1 = 7{,}5$ ohms.

Impédance entre A et B $= \frac{L_1^2\omega_0^2}{2R_1} = 150\,000$ ohms; le bloc entre A et B est équivalent à un circuit bouchon de self L_1, de capacité C_1 et de résistance $2R_1$, donc de surtension égale à 100.

5° Tension entre A et B :

$$150\,000 \times 0{,}3 \times \frac{5}{1\,000} \text{ mV.} = 225 \text{ mV.}$$

Courant dans L_1 (surtension de la bobine L_1 associée au secondaire $= 100$) :

$$I_1 = 100\, I_{MF} = 0{,}15 \text{ mA.}$$

Courant dans L_2 : $I_2 = \frac{M\omega I_1}{R_2} = I_1 = 0{,}15$ mA.

Tension de sortie : $U_2 = L_2\omega_0 I_2 = 235{,}5$ mV.

CHAPITRE XII

LE POSTE ÉMETTEUR A LAMPES.

Organisation générale. — 1° Le poste est constitué d'un maître oscillateur muni d'étages amplificateurs de tension et d'un étage final de puissance qui débite sur l'antenne ou sur un feeder; les blocs de couplage sont du type accordé à simple ou à double circuit (en téléphonie notamment pour former filtre de bande); les lampes sont des triodes ou, pour les petits et moyens étages (jusqu'à 1 kw), des pentodes; dans le but d'obtenir un *rendement appréciable*, le réglage de la polarisation de grille $-U_0$ est fait pour un fonctionnement en classe B ou C.

2° Les problèmes simples envisagés ci-dessous se traitent, avec des données pratiques très différentes, comme les problèmes exposés au Chapitre X.

Etage terminal de puissance. — 1° Schéma de principe à la figure 1. La grille étant polarisée à $-U_0$ pour un fonctionnement en classes B ou C, le courant de plaque est nul en l'absence du signal provenant de l'étage qui précède (état de repos); ledit signal, appliqué en agissant sur le manipulateur, donne un courant de plaque ayant l'une ou l'autre des formes indiquées aux figures (4 et 5, X[e]); l'ensemble des circuits de charge (circuit oscillant + antenne), accordés et disposés sur le circuit de plaque, est équivalent à une résistance pure R_0 pour la pulsation d'accord ω_0 du signal; le courant de plaque comporte des composantes I_0, I_1, I_2 etc. de pulsation zéro (composante continue), ω_0, $2\omega_0$, etc.; désignons par :

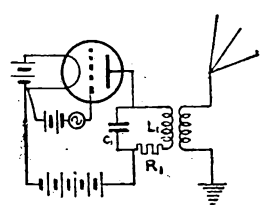


FIG. 1.

E = f.é.m. de la source de plaque;
P_t = puissance fournie par la source de plaque;
P_u = puissance livrée aux circuits de charge;
P_d = puissance dissipée sur la plaque;

on a :

$$P_t = EI_0. \qquad [1]$$

$$P_0 = R_0 I_1^2 = V_1 I_1$$

($V_1 = R_0 I_1$ = tension de plaque aux bornes du primaire). [2]

$$\eta = \text{rendement de l'étage} = \frac{P_u}{P_t} = \frac{V_1}{E} \times \frac{I_1}{I_0} \qquad [3]$$

$$P_d = (P_t - P_u). \qquad [4]$$

2° L'antenne accordée est l'équivalent (fig. 2) d'un circuit accordé qui ramène dans L_1 une résistance de couplage (6 - V^e) :

$$R_c = \frac{M^2 \omega^2_0}{R_2} .$$

Le bloc des deux circuits de charge accordés est équivalent à une résistance pure :

$$R_0 = \frac{L_1^2 \omega_0^2}{R_1 + R_c} .$$

La puissance P_u livrée par la lampe au bloc de charge se répartit entre le primaire (résistance R_1) et l'antenne (résistance R_c) proportionnellement à R_1 et R_c; pour obtenir un rendement important dans ce transfert, il faut que M soit choisi de telle sorte que R_c soit très supérieur à R_1. Lorsque M croît progressivement, le courant J_1 dans L_1 diminue, le courant J_2 dans l'antenne augmente jusqu'à une valeur critique M_c pour diminuer ensuite; le rendement (non pas de l'étage mais dans la répartition de P_u entre le primaire et l'antenne) croît en permanence en passant par 50 % pour M_c; on adopte en pratique une valeur nettement supérieure à M_c.

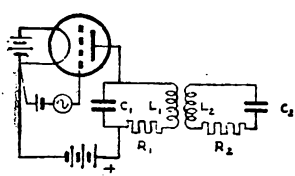


FIG. 2.

APPLICATIONS.

QUESTION DE COURS. — *Production d'oscillations au moyen de lampes. Explication qualitative du fonctionnement d'un montage simple; relation de phase entre les tensions de grille et de plaque; condition d'entretien.*

Remarque : *La réponse à cette question ne devra pas excéder trois pages d'écriture courante.*

1. ***Amplificateur intermédiaire d'un poste d'émission.*** — *On considère (fig. 3) un étage amplificateur d'un poste émetteur travaillant sur* 1 200 *mètres. Sur la plaque de la lampe se trouve un circuit d'accord dont le condensateur a une valeur de* 1,5 *millième de microfarad. L'impédance* R_0 *du circuit est, à l'accord, égale à* 45 000 *ohms.*

Le circuit est couplé en Tesla à la grille de la lampe de l'étage suivant. Le coefficient d'induction mutuelle entre les deux selfs est de 150 *microhenrys.*

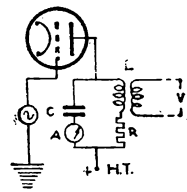


FIG. 3.

Un ampèremètre A placé en série avec le condensateur d'accord indique un courant $I = 2$ *ampères.*

Calculer :

1° *la valeur de la self du circuit d'accord et la surtension de ce circuit;*

2° *les tensions alternatives existant sur la grille et sur la plaque de l'étage considéré et la tension V sur la grille de l'étage suivant;*

3° *le courant sinusoïdal de plaque* I_1;

4° *la puissance dissipée dans le circuit d'accord.*

Les caractéristiques de la lampe sont :

$$K = 15 \qquad r = 30\,000 \text{ ohms.}$$

Remarque : *On admettra que la lampe fonctionne dans les parties rectilignes des caractéristiques.*

Paris, juillet 1939.

SOLUTION.

$$L = 266 \text{ microhenrys.}$$

On a : $$Q = \frac{L\omega}{R}$$

et

$$R_0 = \frac{L^2\omega^2}{R} = 42\,500 = L\omega \times Q = \frac{266}{10^6} \times 2\pi \times \frac{3 \times 10^8}{1\,200} Q = 418 \times Q$$

d'où : $Q = 102$ et $R = 4{,}1$ ohms.

2° Tension sinusoïdale plaque de la première lampe :

$$V_1 = \frac{I}{C\omega} = L\omega I = 418 \times 2 = 836 \text{ volts.}$$

Tension grille de la deuxième lampe :

$$M\omega I = \frac{150}{10^6} \times 2\pi \times 250\,000 \times 2 = 471 \text{ volts.}$$

La tension U appliquée à la grille de la première lampe est telle que :

$$V_1 = KU \times \frac{R_0}{R_0 + r}$$

$$836 = 15\,U \times \frac{42\,500}{72\,500}$$

d'où : $U = 95$ volts.

3° $I_1 = \frac{V_1}{R_0} = \frac{836}{42\,500}$ soit : 20 mA.

4° $P_u = RI^2 = 4{,}1 \times 2^2 = 16{,}4$ watts.

On peut calculer P_u comme suit :

$$P_u = V_1 \times I_1 = 836 \times \frac{20}{1\,000}.$$

2. ***Etage amplificateur.*** — *Une lampe montée en amplificatrice H.F. a les caractéristiques suivantes :*

$$K = 10$$

$$r = 5\,000 \text{ ohms}$$

Le circuit comporte (fig. 1) une self $L_1 = 100$ *microhenrys et une capacité* $C_1 = \frac{1}{1\,000}$ *de* µF. *La résistance ramenée par l'antenne est équivalente à une résistance* $R'_1 = 10$ *ohms en série dans la bobine dont on néglige la résistance (fig. 4).*

1° *Quelle est la fréquence N de résonance ?*

2° *On applique à la grille une tension efficace de 200 V à la fréquence de résonance :*

a) *quelle est la tension V aux bornes du circuit oscillant ?*

b) *quelle est la puissance dans l'antenne ?*

Paimpol, mars 1938.

SOLUTION.

1° $\lambda = 600$ m $\quad N = 500$ kc/s.

2° $\frac{L_1}{C_1 R'_1} = 10^4\ \Omega.$

a) $$V = 200 \times \frac{10^4}{15\,000} \text{ soit } 1\,333 \text{ volts.}$$

b) En fait la résistance R'_1 représente (fig. 4) l'accroissement apparent de résistance dû à l'influence de l'antenne, accroissement égal à :

$$R'_1 = \frac{M^2\omega^2}{R_2}$$

(R_2 = résistance du circuit d'antenne accordé).

La puissance livrée à l'antenne est :

$$P_2 = R'_1 I_1^2$$

avec : $$I_1 = \frac{V}{L\omega} = 4{,}2 \text{ A.}$$

$$P_2 = 10 \times 4{,}2^2 = 176 \text{ Ws.}$$

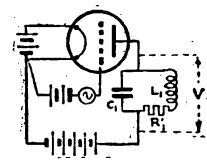


FIG. 4.

QUESTION DE COURS. — *Faites le schéma d'un émetteur de radiotéléphonie modulé par contrôle d'anode. Expliquez le fonctionnement.*

---

3. ***Etage amplificateur.*** — *On considère* (fig. 3) *un étage amplificateur d'un poste émetteur fonctionnant sur* 500 *kc/s. Sur la plaque de la lampe se trouve un circuit accordé dont la surtension est* $Q = 100$. *La self du circuit a pour valeur* $L = 100$ microhenrys. *En série avec le condensateur se trouve un ampèremètre qui indique un courant* $I = 2$ ampères.

Les caractéristiques de la lampe sont :

résistance interne $r = 15\,000$ *ohms,*

$K = 25$ (*pouvoir amplificateur*).

Calculer :

1° *la valeur de la capacité d'accord;*

2° *la tension H.F. V sur la plaque de la lampe;*

3° *la puissance H. F.* P_u *dissipée par effet Joule dans le circuit oscillant;*

4° *la tension* H.F. U *sur la grille de la lampe.*

Paris, novembre 1939.

SOLUTION.

1° $$C = \frac{1}{1\,000} \mu\text{F.}$$

2° $$V = L\omega I = 314 \times 2 = 628 \text{ V.}$$

3° $$R = \frac{L\omega}{Q} = 3{,}14\ \Omega$$

$$P_u = RI^2 = 3{,}14 \times 4 = 12{,}56 \text{ W/s.}$$

4° $$V = KU \times \frac{QL\omega}{r + QL\omega}$$

$$\left(QL\omega = \frac{L}{CR} = 31\,400\ \Omega\right)$$

d'où : $$U = 36{,}92 \text{ V.}$$

QUESTION DE COURS. — *Quels sont les organes essentiels d'un poste récepteur de télégraphie à ondes entretenues pures. — Quel est le rôle de chacun de ces organes ?*

---

4. ***Etage amplificateur.*** — *On considère la lampe terminale d'un poste émetteur de faible puissance, dont les caractéristiques sont :*

$$K = 30 \qquad r = 50\,000 \text{ ohms.}$$

A la grille de cette lampe, montée en amplificatrice, est appliquée une tension U *de* 100 *volts de fréquence* 500 *kc/s.*

Sur la plaque est inséré un circuit formé d'une bobine et d'une capacité en parallèle, accordé sur la fréquence de la tension de grille; la bobine présente une self $L = \frac{1}{10}$ *millihenry et une résistance* $R = 1$ *ohm. La tension continue de plaque est* $E = 3\,000$ *volts; le courant continu débité par la source de tension plaque est :* $I_0 = 25$ mA.

Calculer :

1° *le courant sinusoïdal à travers la bobine et le condensateur;*

2° *la puissance dissipée dans le circuit accordé;*

3° *la puissance dissipée sur la plaque de la lampe.*

Paris, juillet 1935.

SOLUTION.

1° La tension KU produit dans le circuit de plaque un courant :

$$I_1 = \frac{KU}{r + R_0}$$

où : R_0 = résistance équivalente au circuit bouchon =

$$= \frac{L^2\omega^2}{R} = \frac{(100 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 500\,000)^2}{1} = 10^5 \text{ ohms.}$$

On en déduit :

$$I_1 = \frac{30 \times 100}{150\,000} = 0{,}020 \text{ A.}$$

La différence de potentiel aux bornes du circuit bouchon est :

$$V = R_0 I_1 = 10^5 \times 0{,}020 = 2\,000 \text{ volts;}$$

l'impédance $\sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$ de la bobine est pratiquement égale à $L\omega$ en raison de la faible valeur de R; on en déduit la valeur du courant J_1 dans la bobine :

$$J_1 = \frac{V}{L\omega} = \frac{2\,000}{100 \times 10^{-6} \times 2\pi \times 500\,000} = 6{,}3 \text{ A;}$$

le courant J_2 dans le condensateur est :

$$J_2 = CV\omega = J_1.$$

2° La puissance absorbée par le circuit oscillant est :

$$P_u = R_1 I_1^2 = 10^5 \times 0{,}02^2 = 40 \text{ watts}$$
$$= RJ_1^2 = 6{,}3^2.$$

3° La puissance totale livrée par la source de plaque est :

$$P_t = EI_0 = 3\,000 \times 0{,}025 = 75 \text{ watts}$$

d'où la puissance dissipée sur la plaque :

$$P_d = 75 - 40 = 35 \text{ watts.}$$

QUESTION DE COURS. — *Principe de la réception des ondes entretenues pures au moyen d'une hétérodyne. Schéma de principe. Explication du fonctionnement.*

Remarque : *La longueur de la réponse à la question de cours ne devra pas dépasser trois pages d'écriture courante.*

Durée de l'ensemble de l'épreuve (question de cours plus problème) égal 1 h. trois quarts.

5. ***Etage amplificateur.*** — *On considère* (fig. 2) *les étages amplificateurs d'un poste émetteur. Sur la grille d'une des lampes est appliquée une tension efficace* $U = 6$ *volts de fréquence telle que la pulsation soit :*

$$\omega = 10^6.$$

Sur la plaque de cette lampe se trouve un circuit oscillant, couplé très lâchement à un autre circuit oscillant situé sur la grille de la lampe suivante; les deux circuits sont accordés séparément sur la fréquence de la tension appliquée à la grille de la première lampe.

Les caractéristiques des circuits oscillants sont pour le premier circuit :

$C_1 = 25$ *millièmes de microfarad;*

$R_1 =$ *résistance de la bobine* $= 0{,}4$ *ohm;* pour le second circuit :

$L_2 = 100$ *microhenrys;*

$Q_2 =$ *surtension de la bobine pour la fréquence indiquée* $= 100$.

Le coefficient d'induction mutuelle entre les deux selfs est :

$M = 0{,}1$ *microhenry.*

Les caractéristiques de la lampe sont :

$K =$ *pouvoir amplificateur* $= 50$;
$r =$ *résistance interne* $= 2\,000$ *ohms.*

Calculer :

1° *la tension alternative haute fréquence* V_1 *sur la plaque de la première lampe;*

2° *les courants alternatifs haute fréquence* I_L *et* I_C *dans la self et dans la capacité du premier circuit oscillant;*

3° *le courant alternatif haute fréquence* I_2 *dans la self et dans la capacité du deuxième circuit oscillant;*

4° *la tension alternative haute fréquence* U_2 *sur la grille de la première lampe.*

Paris, juillet 1938.

SOLUTION.

1° $L_1 = \dfrac{1}{C_1\omega^2}$ soit 40 µH/s.

$$\frac{L_1}{C_1R_1} = \frac{40 \times 10^{-6}}{25 \times 10^{-9} \times 0{,}4} = 4\,000\ \Omega.$$

$$V_1 = 50 \times 6 \times \frac{4\,000}{6\,000} = 200 \text{ volts.}$$

2° $I_L = I_C = \frac{V_1}{L_1\omega} = 5 \text{ A} = I_1$.

3° On a : $C_2 = C_1 \times \frac{L_1}{L_2} = 10\, m.\,\mu\text{F}$.

$$R_2 = \frac{L_2\omega}{Q_2} = 1\ \Omega\ ;$$

$$I_2 = \frac{M\omega I_1}{R_2} = \frac{0{,}1 \times 10^{-6} \times 10^6 \times 5}{1} = 0{,}5 \text{ A.}$$

4° $U_2 = L_2\omega I_2 = 50$ volts.

6. ***Lampe amplificatrice à refroidissement par un courant d'eau.*** — *On considère un tube émetteur dont l'anode est refroidie par circulation d'eau. En régime d'oscillation, la source de tension anodique débite 2 A sous 10 000 V. Le refroidissement s'effectue dans les conditions suivantes :*

Température de l'eau à l'entrée = 15°.

Température de l'eau à la sortie = 19°.

Débit : 15 *litres par minute.*

La lampe débite dans un circuit oscillant accordé sur la fréquence d'excitation. Ce circuit oscillant comporte une bobine de 350 *microhenrys de résistance inconnue et une capacité de* $\frac{15}{1\,000}$ *de microfarad. L'intensité du courant dans le circuit oscillant est de* 60 *ampères.*

Calculer :

1° *le rendement de la lampe;*

2° *la résistance du circuit oscillant;*

3° *l'intensité* I_1 *du courant H.F. dans le circuit de plaque.*

Bordeaux, 1934

SOLUTION.

1° Puissance livrée par la source :

$$P_t = 20\,000 \text{ watts.}$$

Puissance perdue sur la plaque :

$$P_d = 4{,}18 \times \frac{15 \times 10^3}{60} (19° - 15°) = 4\,180 \text{ watts.}$$

Rendement :

$$\eta = \frac{P_t - P_d}{P_t} = 80\ \%.$$

2° $R = \frac{P_u}{I^2} = \frac{15\,820}{60^2} = 4{,}3\ \Omega.$

3° Impédance équivalente au C.O. :

$$Z = \frac{L}{CR} = 5\,426\ \Omega.$$

On a :

$$ZI_1^2 = P_u \qquad \text{d'où :} \quad I_1 = \sqrt{\frac{P_u}{Z}} = 1{,}7 \text{ A.}$$

7. PROBLÈME. — *Un poste émetteur à ondes entretenues oscille à la fréquence de 500 kc/s. Son étage de puissance comporte une triode dont l'anode est refroidie par une circulation d'eau qui débite 20 litres par minute. Entrant dans la chemise de refroidissement à la température de 15° C., l'eau en sort à 20° C. Le débit de la source de courant continu anodique est 2 ampères; le rendement de la triode, 70 %. L'antenne, accordée sur la fréquence à émettre, présente une résistance de 10 ohms et sa hauteur effective est 15 mètres.*

On néglige toutes les pertes autres que la dissipation de chaleur sur l'anode et on adopte 4,18 comme équivalent mécanique de la petite calorie.

On demande :

1° *la tension anodique continue;*

2° *la puissance fournie au circuit d'antenne;*

3° *l'intensité du courant à la base de l'antenne;*

4° *la puissance rayonnée par l'antenne et son rendement.*

QUESTION DE COURS. — *Amplification de puissance en basse fréquence : rôle du transformateur.*

Marseille, juillet 1942.

SOLUTION.

1° Puissance perdue : $P_d = \frac{20\,000}{60} \times 5 \times 4{,}18 = 7\,000$ watts.

Puissance totale fournie par la source de plaque :

$$P_t = \frac{7\,000}{0{,}30} = 23\,300 = EI_0$$

$$E = \frac{23\,300}{2} = 11\,650 \text{ volts.}$$

2° $P_u = 23\,300 - 7\,000 = 16\,300$ watts.

3° $I_e = \sqrt{\frac{16\,300}{10}} = 40{,}3$ A.

4° $R_r = 1\,600\left(\frac{15}{600}\right)^2 = 1$ ohm. $\qquad P_r = R_r I_e^2 = 1\,630$ watts.

$$\eta = \frac{R_r}{R_t} = 10\ \%.$$

Valeurs de $\frac{I_0}{I}$, $\frac{I}{I_0}$, $\frac{P_0}{P}$ et $\frac{P}{P_0}$ en fonction des valeurs en décibels de

$$Z = 20 \log \frac{I_0}{I} = 10 \log \frac{P_0}{P}.$$

Z Décibels	$\frac{I_0}{I}$	$\frac{I}{I_0}$	$\frac{P_0}{P}$	$\frac{P}{P_0}$	Z Décibels	$\frac{I_0}{I}$	$\frac{I}{I_0}$	$\frac{P_0}{P}$	$\frac{P}{P_0}$
0,1	1,01	0,989	1,02	0,977	6,0	1 99	0,501	3,98	0,251
0,2	1,02	0,977	1,05	0,955	6,5	2,11	0,473	4,47	0,224
0,3	1,03	0,966	1,07	0,933	7,0	2,24	0,447	5,01	0,199
0,4	1,05	0,955	1,10	0,912	7,5	2,37	0,422	5,62	0,178
0,5	1,06	0,944	1,12	0,891	8,0	2,51	0,398	6,31	0,158
0,6	1,07	0,933	1,15	0,871	8,5	2,66	0,376	7,08	0,141
0,7	1,08	0,923	1,17	0,851	9,0	2,82	0,355	7,94	0,126
0,8	1,10	0,912	1,20	0,832	9,5	2,98	0,335	8,91	0,112
0,9	1,11	0,902	1,23	0,813	10,0	3,16	0,316	10,00	0,100
1,0	1,12	0,891	1,26	0,794	11,0	3,55	0,282	12,6	0,079
1,1	1,13	0,881	1,29	0,776	12,0	3,98	0,251	15,8	0,063
1,2	1,15	0,871	1,32	0,759	13,0	4,47	0,224	19,9	0,050
1,3	1,16	0,861	1,35	0,741	14,0	5,01	0,199	25,1	0,040
1,4	1,17	0,851	1,38	0,724	15,0	5,62	0,178	31,6	0,032
1,5	1,19	0,841	1,41	0,708	16,0	6,31	0,158	39,8	0,025
1,6	1,20	0,832	1,44	0,692	17,0	7,08	0,141	50,1	0,020
1,7	1,22	0,822	1,48	0,676	18,0	7,94	0,126	63 1	0,016
1,8	1,23	0,813	1,51	0,661	19,0	8,91	0,112	79,4	0,013
1,9	1,24	0,803	1,55	0,646	20,0	10,00	0,100	100,0	0,010
2,0	1,26	0,794	1,58	0,631	25,0	17,8	0,056	$3,16\times10^{2}$	$3,16\times10^{-3}$
2,2	1,29	0,776	1,66	0,603	30,0	31,6	0,032	10^{3}	10^{-3}
2,4	1,32	0,759	1,74	0,575	35,0	56,2	0,018	$3,16\times10^{3}$	$3,16\times10^{-4}$
2,6	1,35	0,741	1,82	0,550	40,0	100,0	0,010	10^{4}	10^{-4}
2,8	1,38	0,724	1,90	0,525	45,0	177,8	0,006	$3,16\times10^{4}$	$3,16\times10^{-5}$
3,0	1,41	0,708	1,99	0,501	50,0	316	0,003	10^{5}	10^{-5}
3,2	1,44	0,692	2,09	0,479	55,0	562	0,002	$3,16\times10^{5}$	$3,16\times10^{-6}$
3,4	1,48	0,676	2,19	0,457	60,0	1.000	0,001	10^{6}	10^{-6}
3,6	1,51	0,661	2,29	0,436	65,0	1.770	0,0006	$3,16\times10^{6}$	$3,16\times10^{-7}$
3,8	1,55	0,646	2,40	0,417	70,0	3.160	0,0003	10^{7}	10^{-7}
4,0	1,58	0,631	2,51	0,398	75,0	5.620	0,0002	$3,16\times10^{7}$	$3,16\times10^{-8}$
4,2	1,62	0,617	2,63	0,380	80,0	10.000	0,0001	10^{8}	10^{-8}
4,4	1,66	0,603	2,75	0,363	85,0	17.800	0,00006	$3,16\times10^{8}$	$3,16\times10^{-9}$
4,6	1,70	0,589	2,88	0,347	90,0	31.600	0,00003	10^{9}	10^{-9}
4,8	1,74	0,575	3,02	0,331	95,0	56.000	0,00002	$3,16\times10^{9}$	$3,16\times10^{-10}$
5,0	1,78	0,562	3,16	0,316	100,0	100.000	0,00001	10^{10}	10^{-10}
5,5	1,88	0,531	3,55	0,282					

APPENDICE

PROBLÈMES POSÉS AUX RÉCENTS EXAMENS D'OPÉRATEURS RADIO DE LA MARINE MARCHANDE

OBSERVATIONS. — L'intérêt évident de celui qui prépare un examen est de disposer des épreuves posées aux sessions les plus récentes; rien n'est immobile dans le monde et la difficulté d'un examen subit elle-même une évolution dont il faut tenir compte dans la préparation; c'est pour satisfaire à ce principe que nous rassemblons dans cette nouvelle édition les problèmes posés aux derniers examens d'Opérateurs Radio de la Marine Marchande; nous les avons classés dans l'ordre des chapitres du recueil; chaque problème est précédé d'une rubrique indiquant son objet principal et le numéro du chapitre auquel il se rattache.

QUESTION DE COURS. — *La lampe à deux électrodes.*

Principe du fonctionnement; caractéristiques; courant de saturation; usages.

1. PROBLÈME. ***Résonance d'un circuit*** (IV). — *Un Q mètre (fig. 1) est constitué par :*

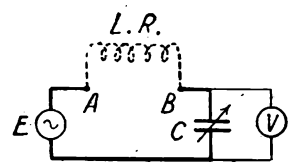


FIG. 1.

a) *Un générateur HF de fréquence connue f donnant une f.e.m. constante E;*

b) *Une capacité étalonnée C;*

c) *Un voltmètre de sortie V, d'impédance pratiquement infinie, branché aux bornes de la capacité.*

1° *On place entre les bornes A et B une self inconnue L.*

Quelle est sa valeur sachant que :

$$f = 50 \text{ Mcs} \qquad C = 40 \text{ pF}$$

la capacité C étant ajustée à la valeur donnant le maximum de déviation V_M sur le voltmètre de sortie ?

2° *On dérègle C de manière à ce que la déviation du voltmètre tombe au cinquième* (1/5) *de sa valeur maxima; la variation de capacité est de* 1 *pF.*

Quelle est la valeur de la résistance R de la bobine ? On suppose les pertes négligeables dans le condensateur étalon.

3° *Le voltmètre de sortie est gradué proportionnellement à la tension aux bornes de* 0 *à* 250; *la graduation* 250 *correspond à une tension de* 0,5 *V; quelle est la valeur de E sachant que la graduation correspondant au maximum de déviation V_M de la première question est* 200 ?

(*Les candidats qui seraient arrêtés par la deuxième question pourront traiter la troisième en supposant connue la valeur de R*).

Paris, avril 1949.

SOLUTION.

1° $L_1 = 0{,}25\ \mu H$, $\lambda = 6$ m.

2° On a : — courant à la résonance : $I_0 = \frac{R}{E}$;

— courant pour la pulsation ω :

$$I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$$

d'où :
$$\frac{I_0}{I} = \sqrt{1 + \frac{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}{R^2}} = 5. \qquad [1]$$

Il faut calculer la réactance $X = \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)$ pour la fréquence de 50 Mcs et pour un circuit désaccordé de self $L_1 = 0{,}25\ \mu H$, de capacité $C = 41$ pF; cette réactance, nulle avant le déréglage de capacité, présente, pour une variation ΔC de la capacité, une valeur :

$$\Delta X = \frac{\Delta C}{C^2\omega} = \frac{\Delta C}{C} \times \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{40} \times 78{,}5 = 1{,}96;$$

où : $\frac{1}{C\omega} = L\omega =$ réactance à la résonance $= 78{,}5$ ohms.

La relation [1] devient :

$$5 = 1 + \left(\frac{1{,}96}{R}\right)^2 ; \quad R = 0{,}4 \text{ ohm.}$$

3° On a : $V_M = QE$; avec : $Q = \frac{78,5}{0,4} = 196$;

d'où : $E = \frac{0,4}{196}$; soit : 2 mV.

QUESTION DE COURS. — *Production d'oscillations au moyen de lampes; montages essentiels; explication qualitative du fonctionnement; relation de phase entre les tensions de grille et de plaque; condition d'entretien dans les cas simples.*

2. PROBLÈME. ***Directivité d'un cadre*** (VIII). — *Un récepteur a pour antenne un cadre circulaire de 40 cm de diamètre composé de 10 spires de fil et placé dans un plan vertical.*

Le cadre est accordé sur la fréquence $f_1 = 2\,000$ Kcs.

1° *Quelle est la hauteur effective du cadre pour la fréquence considérée ?*

2° *Dans le cadre sont induites les forces électromotrices correspondant :*

— *à un émetteur de fréquence $f_1 = 2\,000$ Kcs reçu avec un champ de 2,5 mV/m;*

— *à un émetteur brouilleur de fréquence $f_2 = 2\,010$ Kcs reçu avec un champ de 1 mV/m.*

Les directions de ces deux émetteurs font entre elles à partir du lieu de la réception un angle de 60 degrés.

Quelles sont les f.e.m. E_1 et E_2 induites dans le cadre correspondant à chacun de ces émetteurs lorsqu'on oriente le cadre autour d'un axe vertical :

a) *Pour obtenir un maximum à la réception sur l'émetteur à recevoir (f_1) (fig. 2) ?*

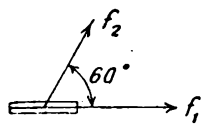


FIG. 2.

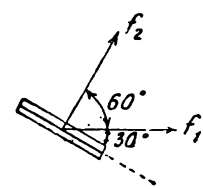


FIG. 3.

b) *Pour obtenir un minimum à la réception sur le brouilleur (f_2) (fig. 3) ?*

c) *Quel est en décibels le rapport entre les courants circulant dans le cadre supposé accordé sur la fréquence $f_1 = 2\,000$ Kcs et correspondant*

à l'émetteur à recevoir sur la fréquence f_1 et au brouilleur sur la fréquence f_2, en fonction de l'orientation du cadre ?

Tracez la courbe représentant la variation de ce rapport en fonction de l'orientation du cadre tournant autour d'un axe vertical.

Le coefficient de surtension du cadre est égal à 100.

Paris, 4 janvier 1949.

SOLUTION.

1° $\lambda = 15\,000$ cm, $h = 5{,}25$ cm pratiquement la même pour les fréquences f_1 et f_2.

2° *a*) $E_1 = 131\ \mu V$, $E_2 = 1\,000 \times 0{,}052\,5 \cos. 60° = 26{,}25\ \mu V$

b) $E_1 = 131 \cos 30° = 113\ \mu V$, $E_2 = 0$.

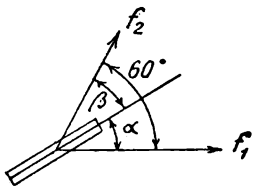


FIG. 4.

c) A égalité des f.e.m. le courant induit par le poste 1 accordé sur le cadre est, au courant induit par le poste 2 désaccordé, dans un rapport :

$$\sqrt{1 + \left(\frac{2Q \times \Delta N}{N_0}\right)^2} = \sqrt{2} = 1{,}41.$$

D'autre part, les f.e.m. induites présentent les valeurs (fig. 4) :

$$E_1 = 131\,|\cos\alpha|\ ; \quad E_2 = 52{,}5\,|\cos\beta| = 52{,}5\,|\cos(\alpha - 60°)|.$$

D'où le rapport des courants :

$$y = \frac{I_1}{I_2} = \frac{131\,|\cos\alpha|}{52{,}5\,|\cos(\alpha - 60°)|} \times 1{,}41 = 3{,}53\left|\frac{\cos\alpha}{\cos(\alpha - 60°)}\right|.$$

La courbe demandée est symétrique par rapport à l'origine (même valeur lorsqu'on remplace α par $(\pi + \alpha)$; on obtient :

α	0	30°	60°	90°	120°	150°	180°
y	7,06	3,53	1,76	0	2,05	∞	7,06
20 log y en db	17	11	5	$-\infty$	6,5	$+\infty$	17

QUESTION DE COURS.

1° *Principe et description simple du type de haut parleur que vous considérez comme le plus répandu.*

2° *Indiquer par un graphique clair la valeur du courant et de la tension le long d'une antenne verticale ayant une longueur de* $\frac{3\lambda}{4}$ *et ayant une extrémité à la terre.*

3. PROBLÈME. ***Pente, résistance intérieure et pouvoir amplificateur d'une triode. Amplification HF*** (IX et X). — *Le montage de la figure* 5 *comporte une triode dont la résistance interne* $r = 20\,000$ *ohms et le coefficient d'amplification* $K = 10$.

Les différences de potentiel sont mesurées par rapport à la cathode reliée à la masse.

1° *Dans cette première partie, on court-circuite* E_1E_2 *et on admet que R est négligeable. On considère les trois états statiques suivants :*

— *Etat* 1 : $Vg = -3$ *volts,* $V_p = 100$ *volts,*
— *Etat* 2 : $Vg = -2$ *volts,* $V_p = 100$ *volts,*
— *Etat* 3 : $Vg = -3$ *volts,* $V_p = 90$ *volts.*

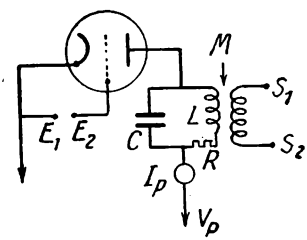


FIG. 5.

Quelle est la valeur du courant plaque I_p *pour les états* 2 *et* 3 *sachant que dans l'état* 1 *il est de* 4 *mA ?*

2° *Pour tout le reste du problème, on connecte entre* E_1 *et* E_2 *une source de f.e.m. égale à* 1 *mV de fréquence* 477 *Kcs.*

Quelle est la longueur d'onde correspondant à cette fréquence ?

3° *Quelle doit être la valeur de C pour que le circuit bouchon soit accordé sur la fréquence de la source, sachant que* $L = 0{,}2$ *mH ?*

4° *Quelle est la valeur de R sachant qu'à l'accord le circuit bouchon présente une impédance de* 40 000 *ohms ?*

5° *Sachant que* $V_g = -3$ *V et* $V_p = 100$ *V.*
Coefficient d'induction mutuelle $M = 1{,}5$ *mH.*

On demande de calculer :

a) *le courant qui traverse C;*

b) *le courant qui traverse L;*

c) *la tension entre* S_1 *et* S_2.

Paris, janvier 1948.

SOLUTION.

1°, *a*) *Etat* 2 :

$$S = \frac{K}{r} = \frac{0{,}5}{1\,000} = \frac{\Delta I_p}{\Delta V_g} = \frac{\Delta I_p}{1} \; ; \; \Delta I_p = 0{,}5 \text{ mA.}$$

d'où le courant = 4,5 mA.

b) *Etat* 3 :

$$r = 20\,000 = \frac{\Delta V_p}{\Delta I_p} = -\frac{10}{\Delta I_p} \; ; \; \Delta I_p = -0{,}5 \text{ mA. Courant} = 3{,}5 \text{ mA.}$$

2° $\lambda = 629$ m.

3° $C = 0{,}55$ mμF.

4° $R = 9$ ohms.

5° *a*) 1,1 μA.

b) 4 mA continu + 1,1 μA en HF.

c) 4,94 mV.

QUESTION DE COURS. — *Lampe à 3 électrodes : caractéristiques; pouvoir amplificateur; résistance intérieure et pente.*

4. PROBLÈME. ***Amplification HF dans un récepteur*** (X). — *On considère le montage de la figure* 6 : *une source HF attaque la grille de commande d'une pentode dont la plaque est couplée à la grille d'une triode. La plaque de la triode débite sur une résistance pure R.*

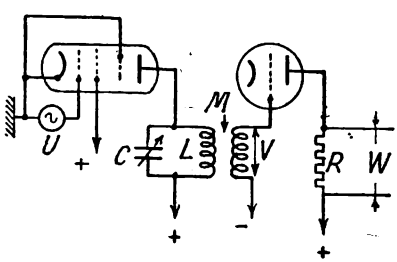


FIG. 6.

La source de fréquence $f = 1$ Mcs donne une tension $U = 10$ mV. Le condensateur a une capacité $C = 1$ mμF, la self un coefficient de surtension $Q = 100$; l'induction mutuelle entre les bobines est $M = 1\mu H$ et la résistance $R = 40\,000$ ohms.

La pentode a une pente $S = 1{,}5$ mA/V et la triode une résistance intérieure $r = 10\,000$ ohms et un coefficient d'amplification $K = 10$.

1° *Quelle est l'intensité HF dans le circuit de plaque de la pentode ?*

2° *Quelle est, pour la fréquence de* 1 *Mcs, la résistance apparente du circuit-bouchon inséré dans le circuit de plaque de la pentode ?*

3° *Quelle est l'intensité HF qui traverse la self de plaque de la pentode ?*

4° *Quelle est la tension HF, V, attaquant la grille de la triode ?*

5° *Quelle est la tension HF, W, aux bornes de la résistance du circuit plaque de la triode ?*

6° *Quelle serait à l'accord la nouvelle valeur du condensateur du circuit-bouchon inséré dans la plaque de la pentode si la fréquence était* 2 *Mcs ?*

Paris, octobre 1949.

SOLUTION.

1° 15 μA.

2° 15 700 ohms.

3° 1,5 mA.

4° V = 9,42 mV.

5° W = 75,4 mV.

6° 0,25 mμF.

QUESTION DE COURS. — *Les lampes de réception. Chauffage de la cathode. Lampe à écran. Lampe pentode.*

5. PROBLÈME. ***Amplification HF dans un récepteur et production d'oscillations*** (X et XI). — *On se propose d'étudier un ampli HF devant fonctionner sur 5 Mcs. On réalise le montage de la figure 7.*

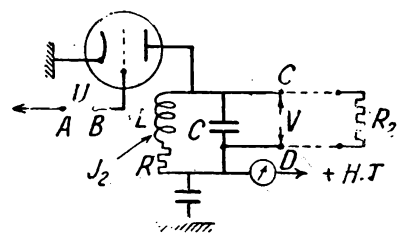


FIG. 7.

1° *On demande la valeur de la self L sachant que la valeur de la capacité C est de 500 pF.*

2° *On fonctionne dans tout ce qui suit en classe A.*

a) *Quelle est la valeur R_0 de la résistance de charge équivalente au circuit bouchon ?*

b) *Quelle est la valeur de la résistance série R de la bobine sachant que :*

— *le coefficient d'amplification K = 40;*

— *la résistance interne r = 20 000 ohms;*

— *le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée* $\frac{V}{U} = 20$?

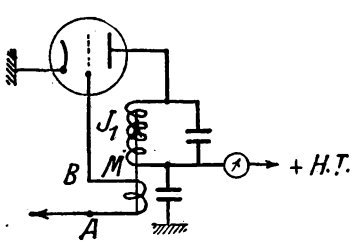


FIG. 8.

3° *On place entre les bornes A et B une self que l'on couple faiblement à la self d'accord* (fig. 8). *Pour quelle valeur de l'induction mutuelle M la lampe commence-t-elle à osciller ?*

4° *On place entre les bornes C et D une résistance $R_2 = 5\,000$ ohms représentant la charge de l'étage suivant (fig. 7).*

On donne la tension plaque V_p : 350 *V*;

$U = 5$ *V*;

$I_p = 65$ *mA continus.*

On demande le rendement ρ *de l'étage amplificateur :*

$$\rho = \frac{P_u}{P_t} = \frac{\textit{puissance livrée à } R_2}{\textit{puissance source}}$$

5° *Les conditions calculées ci-dessus correspondent-elles à une utilisation correcte du tube ? Peut-on augmenter le rendement et la puissance de sortie ? Expliquer succinctement les modifications apportées au fonctionnement.*

Marseille, juillet 1949.

SOLUTION.

1° $L = 2\mu H$.

2° $\dfrac{V}{U} = K \dfrac{R_0}{r + R_0} = 20$;

d'où : $R_0 = r = 20\,000$ ohms; $R = \dfrac{L^2\omega^2}{R_0} = 0{,}2$ ohm.

3° A la figure 7, une tension $U = 1$ V donne $V = 20$ V et le courant J_1 dans L est : $J_1 = \dfrac{V}{L\omega}$ (R négligeable vis-à-vis de $L\omega$) $= \dfrac{1}{\pi}$ A; l'accrochage des oscillations s'établit lorsque M est tel que : $M\omega J_1 = U$ soit : $M = 0{,}1$ μH.

4° $P_t = 27{,}75$ watts. La résistance R_2 est suffisamment importante pour que son branchement n'entraîne point une diminution appréciable de V; d'où : $P_u = \dfrac{V^2}{R_2} = 2$ watts et $\rho = 7{,}2$ %.

5° En pratique, on recherche un rendement très supérieur; l'antenne accordée de résistance R_2 (fig. 9) ou le feeder (fig. 10) sont alimentés par

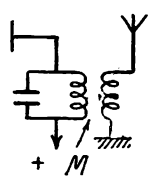


FIG. 9.

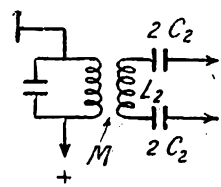


FIG. 10.

induction mutuelle M de valeur très supérieure à la valeur critique (l'antenne est accordée, ainsi que le circuit C_2L_2).

QUESTION DE COURS. — *Radiotéléphonie : dispositifs simples de modulation. Schémas.*

6. PROBLÈME. ***Amplification HF dans un récepteur*** (X). — *Une pentode haute fréquence fonctionne en classe A dans les conditions suivantes (fig.* 11) :

— *Polarisation :* — 3 *V.*
— *Ecran* = + 100 *volts et* 2 *mA.*
— *Plaque :* + 250 *volts et* 6 *mA.*

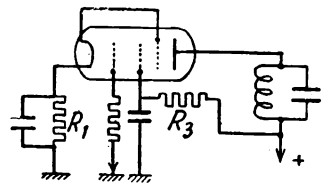


FIG. 11.

1° a) *On demande la valeur de la résistance de cathode et de la résistance insérée dans l'écran.*

b) *Même question si l'alimentation de l'écran se fait en pont, avec une résistance entre écran et masse égale à* 20 000 *ohms (on néglige la tension de polarisation devant la tension écran et la tension plaque).*

2° *Le circuit oscillant de plaque est constitué par une self de* 100 μH *et une capacité de* 100 *pF.*

Calculer la fréquence F de résonance du circuit oscillant ainsi que la longueur d'onde correspondante.

3° *Quel est le gain G de cet étage sur sa fréquence de résonance F, sachant que la pente de la lampe est de* 1 *mA/V et que le coefficient de surtension du circuit est de* 50 *(on considère la résistance interne de la lampe comme infinie).*

4° *Quelle est la puissance* P_u *dissipée dans le circuit oscillant pour l'attaque grille maxima en classe A. Evaluer le rendement r en considérant l'énergie fournie par la batterie haute tension.*

5° *Mêmes questions de gain d'énergie dissipée et de rendement dans les mêmes conditions si ce n'est la mise en parallèle sur le circuit oscillant d'une capacité supplémentaire de* 100 *pF sans perte.*

Paris, octobre 1948.

SOLUTION.

1° *a*) $R_1 = 375$ ohms. $\quad R_2 = \dfrac{250 - 100}{\dfrac{2}{1\,000}} = 75\,000$ ohms.

b) Montage en pont (fig. 12) — Courant dans R_4 :

$$I_4 = \frac{100}{20\,000} = 5 \text{ mA.} \qquad R_3 = \frac{150 \text{ V}}{\dfrac{2+5}{1\,000}} = 21\,470 \text{ ohms.}$$

2° $F = 1\,579$ Kcs. $\lambda = 190$ m.

3° Charge plaque : $QL\omega = 50\,000$ ohms; $G = \frac{V}{U} = S \times QL\omega = 50$.

4° Tension plaque minima $= V_m = (250 - 50\,000\ I_1)$, où I_1 = amplitude composante HF de plaque; I_1 croît proportionnellement à U (amplitude tension HF de grille) et ne peut dépasser une valeur telle que $V_m = 0$ au delà de laquelle le fonctionnement n'est plus en classe A; d'où :

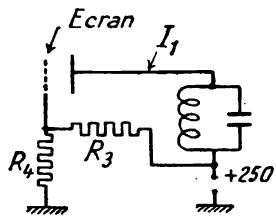


Fig. 12.

$$I_1 = \frac{250}{50\,000}, \text{ soit } 5 \text{ mA}$$

correspondant à une valeur U_M telle que : $I_1 = SU_M$, soit $U_M = 5$ V;

d'où :
$$P_u = \frac{V_M \times I_1}{2} = 0{,}625 \text{ watt}$$

(V_M = amplitude de tension plaque = 250 V).

$$P_t = \frac{8}{1\,000} \times 250 = 2 \text{ watts (courant anode + courant écran).}$$

$$r = 31{,}25\ \%.$$

5° Capacité doublée : $F' = \frac{F}{\sqrt{2}} = 1\,117$ Kcs.

Charge de plaque $R_0 = 25\,000$ ohms. Le fonctionnement en classe A est limité par la valeur de U conduisant (fig. 13) en P_0 avec une amplitude du courant HF de plaque $I_1 = \frac{6}{1\,000}$ A; on a :

$$S = \frac{1}{1\,000} = \frac{\frac{6}{1\,000}}{U_M}$$

$U_M = 6$ V correspondant à une tension HF plaque d'amplitude :

$$V_M = SU_M R_0 = 150 \text{ V;}$$

d'où :
$$P_u = \frac{V_M I_1}{2} = 0{,}45 \text{ watt}$$

$$P_t = 2 \text{ watts,}$$

$$r = 22{,}5\ \%.$$

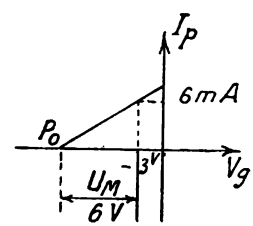


Fig. 13.

QUESTION DE COURS. — *Le haut-parleur.*

7. PROBLÈME. ***Amplification HF dans un récepteur*** (X). — *Un étage amplificateur HF est réalisé selon le schéma de la figure* 14, *avec :*

$R_1 =$ 250 ohms $C_1 = 0{,}1$ µF
$R_2 =$ 50.000 —
$R_3 =$ 50.000 — $C_2 = 0{,}1$ —
$R_4 =$ 10.000 —
$R_5 =$ 100.000 — $C_3 = 500$ pF

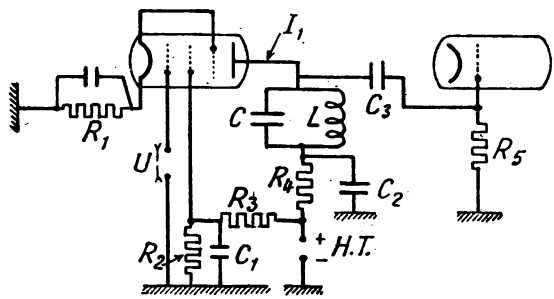


FIG. 14.

Le circuit oscillant de plaque, accordé sur la fréquence de 500 *Kcs, comprend une bobine possédant une self-inductance de* 200 µ*H et une résistance de* 4 *ohms.*

1° *On demande la valeur C de la capacité d'accord du circuit oscillant.*

2° *La f.e.m. de plaque* $E = 300$ *V ; les tensions aux bornes de* R_1 *et* R_4 *étant respectivement égales à* 2,5 *et* 80 *V, déterminez la tension de polarisation de la grille écran par rapport à la masse.*

3° *La pente de la pentode est égale à* 2 *mA/V. Une tension U de* 0,01 *V, de fréquence* 500 *Kcs étant appliquée à la grille d'entrée de la première lampe, on demande la valeur de la tension HF appliquée à la grille de la lampe suivante.*

Paris, juillet 1949.

SOLUTION.

1° $C = 0{,}5$ mµF.

2° Courant dans $R_1 = 10$ mA $= I_1$. Courant dans $R_4 = \frac{80}{10^4} =$ 8 mA $= I_4$.

Courant d'écran : $I_1 - I_4 = 2$ mA.

On a (fig. 15) (Lois de Kirchoff) : $R_3I_3 + R_2I_2 = 300$

$$I_3 = \left(\frac{2}{1\,000} + I_2\right) \text{(point A)}$$

d'où : $I_2 = 2$ mA. Pol. écran $= R_2I_2 = 100$ V.

Courant débité par la source (point B) $= (I_0 + I_2) = 12$ mA.

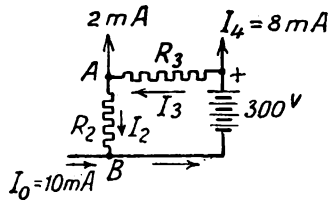


FIG. 15.

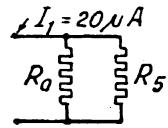


FIG. 16.

3° Courant de plaque : $I_1 = SU = 20$ µA.

Le circuit CL est équivalent à une résistance : $\frac{L^2\omega^2}{R} = R_0 = 10^5$ ohms; R_4 est court-circuité par C_2 en HF et la charge de plaque (fig. 16) présente la valeur : 50 000 ohms, donnant une tension d'attaque de la deuxième lampe :

$$50\,000 \times \frac{20}{10^6} = 1 \text{ V.}$$

QUESTION DE COURS. — *L'amplification HF dans un poste récepteur. Schéma et propriétés des modes de couplage à résonance, par transformateur et par résistance. Montage symétrique.*

8. PROBLÈME. ***Amplification BF par pentode ou triode*** (XI). — *On dispose de deux lampes présentant les caractéristiques suivantes : une pentode de pente 2,1 mA/V, de résistance intérieure très grande et une triode de pente 2,1 mA/V et de résistance intérieure égale à 10 000 ohms. Dans tout ce qui suit, le fonctionnement est en classe A.*

1° *Une tension égale à 1 V, de fréquence* $\frac{5\,000}{\pi}$, *est appliquée à la grille de la pentode; valeur de la composante sinusoïdale* I_1 *du courant de plaque ? Le transformateur inséré sur le circuit de plaque de la pentode (fig. 17) présente une self primaire et une induction mutuelle entre enroulements respectivement égaux à 1 henry; valeur de la tension aux bornes du secondaire ?*

2° *On remplace la pentode par la triode (fig.* 18); *valeurs de la composante sinusoïdale* I_1 *du courant de plaque et de la tension aux bornes du secondaire du transformateur ?*

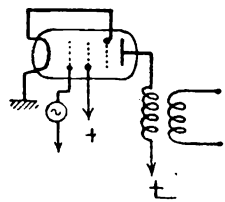


FIG. 17.

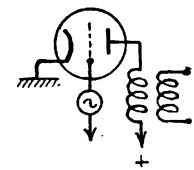


FIG. 18.

3° *On utilise (fig.* 19) *un couplage par résistance; valeurs de la tension sinusoïdale aux bornes de cette résistance avec la pentode ou la triode ?*

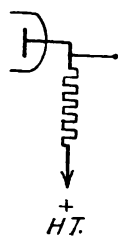


FIG. 19.

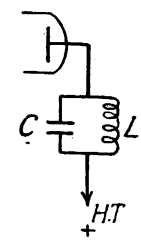


FIG. 20.

4° *La charge de plaque est constituée (fig.* 20) *d'une bobine de* 0,2 *henry et* 100 *ohms, en parallèle avec la capacité C; valeurs de C donnant la résonance et du coefficient de surtension Q du circuit ? Valeurs de la tension aux bornes du circuit accordé dans le cas d'une triode ou d'une pentode ?*

Nantes, juin 1949.

SOLUTION.

1° $I_1 = 2{,}1$ mA. $V = 10{,}5$ V.

2° $I_1 = 1{,}9$ mA. $V = 9{,}5$ V.

3° Pentode : $V = 10{,}5$ V triode : $V = 7$ V, 4.

4° $C = \frac{1}{5}\ \mu F$ $Q = 10$ pentode : $V = 105$ V, triode : $V = 17{,}5$ V.

QUESTION DE COURS. — *Multiplication de fréquence.*

9. PROBLÈME. ***Amplification BF dans un récepteur*** (XI et XII). — *Un amplificateur à BF se compose de deux étages montés suivant le schéma de la figure 21. Les deux pentodes utilisées ont des pentes respectivement égales à* $S_1 = 2$ *mA/V et* $S_2 = 9$ *mA/V; la f.e.m. de la source de plaque* $E = 300$ *V.*

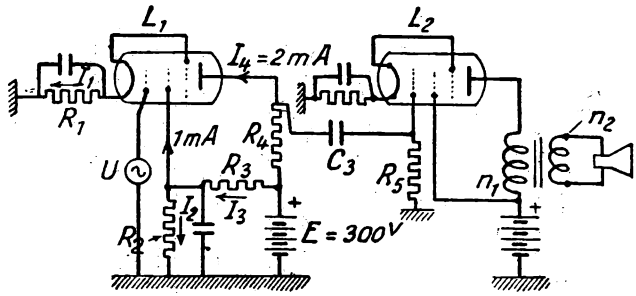


FIG. 21.

1° *En l'absence de signal à BF, la tension aux bornes de* R_1 *est égale à 3 V et le courant de plaque ou d'anode est de 2 mA; calculer les puissances dissipées dans les résistances* R_1, R_2, R_3, R_4 *? On donne :* $R_1 = 10^3$; $R_2 = R_3 = R_4 = 10^5$.

$$R_5 = 4 \times 10^5 \text{ (valeurs en ohms).}$$

2° *La tension BF,* U_2 *appliquée à la grille de la première lampe étant égale à 0,01 V, calculer la puissance fournie à la bobine du haut-parleur (de résistance égale à 2 ohms) à travers le transformateur de rapport* $\frac{n_1}{n_2} = 60$. *On suppose que la réactance de* C_3 *est négligeable.*

Paris, avril 1948.

SOLUTION.

1° I_1 = courant dans $R_1 = 3$ mA = courant plaque + courant écran; d'où : courant écran = 1 mA.

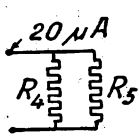


FIG. 22.

On obtient, suivant un calcul identique à celui du problème n° 7 :

$$I_4 = 2 \text{ mA} \qquad I_3 = 2 \text{ mA} \qquad I_2 = 1 \text{ mA}$$

d'où le calcul des puissances demandées.

2° Courant plaque lampe $L_1 = \frac{2}{1\,000} \times \frac{1}{100}$ soit 20 μA;

Résistance équivalente à R_4 et $R_5 = 80\,000$ ohms (fig. 22);

Tension grille lampe $L_2 = 1{,}6$ volt;

Courant plaque lampe $L_2 = \frac{9}{1\,000} \times 1{,}6$, soit : 14,4 mA;

Courant bobine du haut parleur : $14{,}4 \times 60 = 86{,}4$ mA;

Puissance fournie au HP = environ 15 mW.

QUESTION DE COURS. — *Propagation d'un courant sinusoïdal sur un fil horizontal indéfini; vitesse de propagation; longueur d'onde; résistance caractéristique de la ligne.*

10. PROBLÈME. ***Amplification de puissance dans un émetteur*** (XII). — *Un étage amplificateur HF modulé (amplification linéaire) est constitué par une triode fonctionnant en classe B dont le circuit oscillant de plaque est formé d'une self :*

$$L = 12{,}5 \ \mu H$$

et d'une capacité :

$$C = 500 \ pF.$$

Le coefficient de surtension de ce circuit est $Q = 20$.

1° *Calculer la fréquence F sur laquelle est accordé le circuit oscillant.*

2° *Calculer la tension HF, V, aux bornes du circuit oscillant de plaque en régime d'onde porteuse non modulée et à la fréquence F, sachant que le courant anodique HF présente une amplitude :*

$$I = 0{,}8 \ A.$$

3° *Calculer le rendement anodique r en régime d'onde porteuse non modulée sachant que la tension continue de plaque appliquée à la lampe triode est :*

$$E = 6\,000 \ V$$

et que le courant continu de plaque est :

$$I_0 = 0{,}5 \ A.$$

4° *Calculer, dans les mêmes conditions, les amplitudes du courant et de la tension anodique HF en crête de modulation dans le cas d'une modulation sinusoïdale de l'onde porteuse à* 50 % *et à* 100 %.

Nancy, août 1949.

SOLUTION.

1° 2 Mcs.

2° $QL\omega = 3\,141$ ohms $\quad V = 2\,513$ V.

3° $P_t = 3\,000$ w $\quad P_u = \dfrac{0{,}8 \times 2\,513}{2} = 1\,005$ w $\quad r = 33\ \%$.

4° $M = 50\ \%$ $\quad I_1 = 0{,}8\,(1 + 0{,}5)$ $\quad V_1 = 2\,513\,(1 + 0{,}5)$

$M = 1$ $\quad I_2 = 0{,}8 \times 2$ A $\quad V_2 = 2\,513 \times 2$ V.

QUESTION DE COURS. — *L'amplification HF dans un poste récepteur; schéma et propriétés des modes de couplage à résonance, par transformateur et par résistance; montage symétrique.*

11. PROBLÈME. ***Amplification de puissance d'un émetteur et alimentation d'une antenne par feeder*** (XII). — *Le circuit oscillant d'anodes de l'étage de puissance d'un émetteur de télégraphie sur ondes courtes comprend une self variable L et trois condensateurs fixes en série C_1, C_2 et C_3.*

1° *On donne :* $C_1 = C_2 = C_3 = 75$ *pF.*

Valeur de la self L pour réaliser l'accord du circuit sur la longueur d'onde de 30 m.

2° *On connecte (fig. 23) aux bornes du condensateur C_2 une résistance R de 600 ohms refroidie par un courant d'eau. L'émetteur fonctionnant en trait continu, on constate que, pour un débit de 43 litres par minute, l'élévation de température de l'eau à la sortie du circuit de refroidissement de la résistance est de 9°. En déduire la puissance HF dissipée dans la résistance en admettant que celle-ci se retrouve entièrement sous forme de chaleur dans l'eau de refroidissement. En déduire le rendement r de l'étage sachant que la tension anodique est de 12 000 V et l'intensité fournie par la source d'alimentation de 3,75 A.*

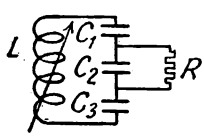


FIG. 23.

3° *On retire la résistance R et on la remplace (fig. 24) aux bornes de C_2 par les deux brins d'un feeder de résistance caractéristique 600 ohms et de 300 m de long.*

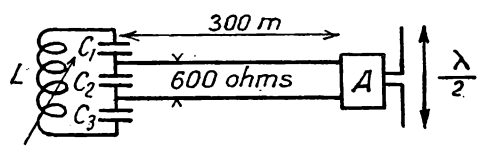


FIG. 24.

Ce feeder alimente par un dispositif d'adaptation convenable A une antenne demi-onde de résistance de rayonnement 80 ohms. Le rendement global de l'antenne et de son dispositif d'adaptation est de 80 % et on sait par ailleurs que, pour un régime de fonctionnement en ondes progressives (que l'on suppose réalisé), l'affaiblissement du feeder est tel que, si I est l'intensité en l'un quelconque de ses points, l'intensité en un point situé 100 mètres plus loin de l'extrémité alimentée se trouve être égale à 0,9 I. On demande quelle est la puissance P_2 rayonnée par l'antenne demi-onde et l'intensité en son centre.

Marseille, octobre 1949.

SOLUTION.

1° $L = 10$ µH.

2° $P_t = 12\,000 \times 3{,}75 = 45\,000$ watts.

Puissance dissipée :

$$P_d = \frac{43\,000}{60} \times 9 \times 4{,}18 = 27\,000; \quad P_u = 18\,000; \quad r = \frac{18}{45} = 40\ \%.$$

3° On livre au feeder 27 kW sur 600 ohms; le courant et la tension décroissent simultanément dans le même rapport le long de la ligne et le rendement en *puissance* pour 100 mètres est égal à :

$$0{,}9 \times 0{,}9 = 0{,}81, \text{ soit, pour } 300 \text{ m} : 0{,}81^3 = 0{,}53;$$

d'où la puissance antenne : $P_2 = 27 \times 0{,}53 \times 0{,}8 = 11{,}43$ kW
et le courant dans l'antenne :

$$\sqrt{\frac{11\,430}{80}} = 12 \text{ A}.$$

N. B. — On calcule sans difficulté le courant et la tension à l'origine et à l'extrémité du feeder :

Origine :	$I_0 = 6{,}7$ A	$U_0 = 4\,020$ V.
Extrémité :	$I_1 = 4{,}86$ A	$U_1 = 2\,916$ V.

ÉPREUVES DE 1950 à 1955

1° Le champ des problèmes s'est élargi depuis 1950, portant, notamment, sur les montages amplificateurs à grille à la masse, la contre-réaction, le bruit d'un récepteur, les oscillateurs à dents de scie, la modulation de fréquence, les hyperfréquences et le radar; l'usage d'une appréciation en décibels s'est largement développé.

2° La première opération du candidat consiste, en lisant le texte du problème, à traduire dans le mode de représentation qui lui est familier les schémas donnés dans le texte sous des aspects variés : la reconnaissance d'un montage classique demande parfois un examen approfondi; dans un but de concision et d'uniformisation, nous avons légèrement transformé les énoncés et schémas des textes officiels.

3° Quelques références sont faites au Cours Moyen de Radioélectricité sous la forme (C.M. n° 10-X = n° 10 du chap. X). Le nombre (V p. ex.) à droite du titre d'une application qui suit indique le chapitre du présent ouvrage dans lequel celle-ci doit être normalement classée.

1. LOGARITHMES. — *Connaissant :* $\log 2 = 0{,}3$; $\log 3 = 0{,}5$ *environ :*

1° *Calculer les logarithmes des quantités :*

$$\sqrt{2};\ \sqrt{3};\ \frac{\sqrt{2}}{2};\ \frac{\sqrt{3}}{2};\ \frac{2}{3};\ \frac{3}{2};\ 5;\ \frac{1}{5};\ 6;\ 9;\ 15;\ \text{etc.}$$

$2^p\ 3^q$ *où p et q sont positifs ou négatifs, entiers ou fractionnaires.*

2° *Calculer* $\log \sin x$ *pour les angles :* $x = 30°;\ 45°;\ 60°$ et $90°$;

3° *Valeurs des nombres ayant un logarithme égal à :*

$$0{,}2;\ 0{,}4;\ 0{,}6;\ 0{,}7;\ 0{,}8;\ 0{,}9,\ \text{etc.}$$

1° On a : $\log \sqrt{2} = \frac{1}{2} \log 2 = 0{,}15$; $\log \frac{3}{2} = \log 3 - \log 2 = 0{,}2$; $\log 5 = \log \frac{10}{2} = \log 10 - \log 2 = 0{,}7$; $\log 6 = \log 2 + \log 3$; $\log 9 = \log 3^2 = 2 \log 3$; $\log 15 = \log 3 + \log 5 = 1,2$, etc.

2° $\log \sin 60° = \log \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{1}{2} \log 3 - \log 2 = -0{,}05.$

3° $0{,}2 = 0{,}5 - 0{,}3 = \log 3 - \log 2 = \log \frac{3}{2}$; $0{,}8 = 0{,}5 + 0{,}3 = \log 3 + \log 2 = \log 6$, etc.

QUESTION DE COURS. — *Modulation d'amplitude : conditions à réaliser; modulation par contrôle de plaque ou de grille; distorsion.*

2. PROBLÈME ***Circuits couplés*** (V). — *On couple un générateur H.F. E, de résistance interne* $R_1 = 75\Omega$ *à une résistance* R_2 *à travers les éléments* C_1L_1 *et* C_2L_2 *(fig. 1-V) où* $L_1 = L_2 = 25\ \mu H$.

Fréquence du générateur :

$$\frac{10^7}{2\pi} \text{ c/s.}$$

1° *Valeurs de* C_1 *et* C_2 *donnant l'accord de chaque circuit;*

2° *Expression, dans ces conditions, de l'impédance entre A et B en fonction de M et* R_2*;*

3° *Valeur de M correspondant à l'adaptation pour une valeur donnée de* R_2*; quelle est la plus grande valeur de* R_2 *compatible avec le coefficient de couplage maximum 0,4 réalisable entre* L_1 *et* L_2*;*

4° *Valeur de M pour une valeur de* R_2 *correspondant à une surtension* $Q_2 = 100$.

Nancy, 1952.

SOLUTION :

1° $C_1 = C_2 = 0{,}4$ mμF.

2° $\frac{M^2\omega^2}{R_2}$.

3° $\frac{M^2\omega^2}{R_2} = R_1$; induction M maxima $= 10\ \mu H$.

QUESTION DE COURS. — *Influence de traces de gaz dans les lampes. Thyratron.*

3. PROBLÈME. ***Antenne d'émission*** (VI). — *Antenne faite (fig. 1 a) d'un fil vertical de 20 m et de capacité 100 pF.*

1° *Valeurs de la fréquence de première résonance, de la self propre et de la résistance de rayonnement* R_r*;*

2° *Valeur de l'impédance X à la base pour un accord sur 5 Mc/s;*

3° *On alimente par un feeder de* 210 *m, de résistance* $Z_0 = 160\ \Omega$; *décrire sommairement le régime de fonctionnement du feeder; taux d'ondes stationnaires et valeur du rapport de transformation n du transformateur supposé parfait à disposer en BC pour une adaptation convenable* (*on suppose que* R_r *conserve la valeur du* 1°).

Marseille, 1953.

SOLUTION :

1° $\lambda_1 = 80$ m; fréquence : 3,75 Mc/s.

$$L_e = 17{,}8\ \mu H;\ h_e = \frac{2}{\pi} \times 20 = 12{,}73\ \text{m};\ R_r = 39{,}4\ \Omega.$$

2° X donnant l'accord sur 60 m est une capacité qui, en série avec 100 *p*F, donne une capacité de 56 *p*F, soit : X = 127 *p*F.

3° Le feeder de 160 Ω débite sur une charge de 39,4 Ω et il y a réflexion partielle en B; coefficient de réflexion :

$$\frac{\text{tension réfléchie}}{\text{tension incidente}} = -\frac{\text{courant réfléchi}}{\text{courant incident}} = \frac{39{,}4 - 160}{39{,}4 + 160} = -0{,}7.$$

Le courant et la tension se réfléchissent dans la proportion de 0,7 avec déphasage de π de la tension réfléchie et sans déphasage du courant : il y a un ventre de courant et un nœud partiel de tension en B; le courant et la tension en B sont respectivement égaux à 1,7 et 0,3 fois le courant et la tension incidents; à une distance $\frac{\lambda}{4} = 15$ m de B sur le feeder, on a un nœud partiel de courant représentant une fraction $(1 - 0{,}7) = 0{,}3$ du courant incident et un ventre de tension représentant $(1 + 0{,}7) = 1{,}7$ de la tension incidente; taux d'ondes stationnaires $\frac{\text{courant en B}}{\text{courant en D}} = \frac{1{,}7}{0{,}3} = 5{,}7$; le départ en A, à 210 m $= 7\frac{\lambda}{2}$ de B, est un nœud de courant.

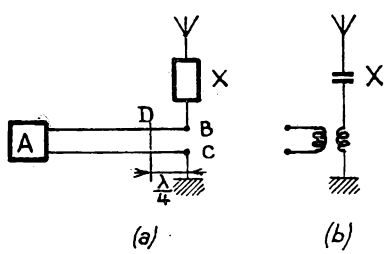


FIG. 1.

$n = \sqrt{\frac{39{,}4}{160}}$ soit $\frac{1}{2}$: transformateur abaisseur de tension (fig. 1 *b*).

QUESTION DE COURS. — *Propagation d'un courant sur un feeder bifilaire ou coaxial; adaptation terminale.*

4. PROBLÈME. ***Amplification à H.F.*** (X). — 1° *On a, dans le montage amplificateur de la figure 2 : pente de la lampe : $S = 2\ mA/V$; résistance interne infinie; la réactance de Cg et la résistance de la bobine L sont négligeables; $R_g = 10\,000\ \Omega$.*

Le coefficient de surtension du circuit amorti par R_g est égal à 100.

Valeurs de C et L;

2° *On remplace la pentode par une triode de résistance interne* = 10.000 Ω *qui amortit le circuit CL comme la résistance R_g; valeur du nouveau coefficient de surtension;*

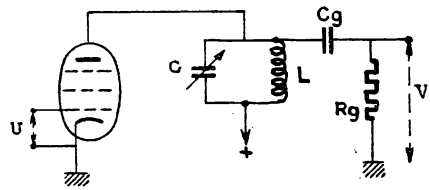


FIG. 2.

3° *La bobine L, dans le montage avec pentode, est remplacée par une bobine de même self et de résistance* 1 Ω; *valeur du coefficient de surtension apparent du circuit.*

Paris, octobre 1953.

SOLUTION :

1° On a : $$Q = 100 = \frac{L\omega}{R};$$

où R est donné par (14-IV) : $R = \frac{L^2\omega^2}{R_g}$; d'où : $L\omega = \frac{R_g}{100}$ et $L = 32\ \mu H$; $C = 3{,}1\ m\mu F$; $R = 1\ \Omega$ — Impédance de plaque : $QL\omega = 10\,000 = R_g$ (l'impédance de CL est infinie et l'impédance de plaque est réduite à R_g);
courant plaque : $I_p = SU$;
tension aux bornes de R_g : $V = R_g I_p = R_g SU$;
amplification : $\frac{V}{U} = SR_g = \frac{2}{1\,000} \times 10\,000 = 20.$

2° La triode introduit dans le circuit CL une résistance apparente double, soit 2 Ω; le coefficient de surtension apparent devient égal à 50.

3° Surtension apparente = 50.

QUESTION DE COURS. — *Rôle des électrodes d'une pentode. Leur alimentation.*

5. PROBLÈME. ***Amplification à H.F.*** (fig. 3) (X). — *Le courant de plaque d'un étage amplificateur H.F. répond à la relation :*

$$20\,000\ I_p = V_p + 5\ V_g - p. \qquad [1]$$

La tension HF à amplifier U est appliquée entre A et B par induction dans un enroulement d'impédance négligeable.

1° *Z est une résistance pure R.*

a) *Former les expressions des tensions instantanées V_p et V_g en fonction de U et I_p; en déduire la relation qui lie V à U;*

b) *Comparer cette expression en grandeur et signe à celle qui donne l'amplification du même tube monté en amplificateur classique.*

Indiquez pourquoi ce montage (amplificateur inversé) réduit le risque d'accrochage intempestif en H.F.

2° *Z est un bouchon accordé sur la fréquence* 15 *Mc/s du signal reçu, de self* $= 10$ *µH et de surtension* $Q = 50$.

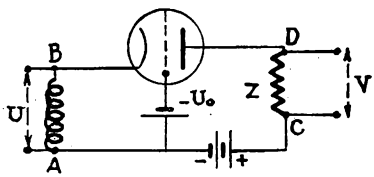


FIG. 3.

a) *Valeur de la capacité d'accord du bouchon et de l'impédance équivalente entre C et D :*

— pour le courant continu;

— pour le courant HF;

(on suppose la résistance de la bobine indépendante de la fréquence).

b) *Valeur de l'amplification dans les deux cas du montage classique et du montage de la figure* 3.

Paris, 1955.

SOLUTION :

1° a) *En l'absence de signal :* $V_g = -U_0$; $V_p = E - RI_{p_0}$ le courant continu I_{p_0} se déduit de l'équation donnée :

$$20\,000\ I_{p_0} = E - RI_{p_0} - KU_0 - p. \qquad [2]$$

Arrivée d'un signal :

$$V_g = -U_0 + U\sqrt{2}\cos\omega t$$
$$V_p = E + U\sqrt{2}\cos\omega t - RI_p$$

d'où le courant *total* I_p tel que :

$$20\,000\,I_p = E - RI_p + U\sqrt{2}\cos\omega t - KU_0 + KU\sqrt{2}\cos\omega t - p \qquad [3]$$

soit, par différence entre [2] et [1], le courant $(I_p - I_{p_0}) = i_p$

$$i_p = \frac{U\sqrt{2}(1+K)}{R + 20\,000}\cos\omega t \qquad [4]$$

et la tension aux bornes de R : $v = Ri_p$.

b) Dans le montage classique, on a : $V_p = E - RI_p$ et l'on remplace dans [4] la quantité $(1 + K)$ par K : le montage nouveau augmente de 1 le pouvoir amplificateur; de plus, la grille à potentiel constant forme écran entre les circuits d'entrée AB et de sortie; il n'y a pas de couplage sensible et pas d'accrochage intempestif.

2° *a*) $C = 11\ pF$; résistance de la bobine $= \dfrac{L\omega}{Q} = 18{,}84\ \Omega$. Impédance en continu $= 18{,}84$ et en H.F. $= QL\omega = 47\,100\ \Omega = R_0$.

b) Amplification (on remplace dans [4] R par R_0) : 4,2 et, dans le montage classique : 3,5.

QUESTION DE COURS. — *Magnétron; description sommaire; principe du fonctionnement.*

6. PROBLÈME. ***Amplification B.F. (couplage par résistance)*** (XI) (fig. 4).

1° *Interrupteur M fermé.*

a) *Calculer l'amplification* $A = \dfrac{V}{U}$ *des deux étages avec les valeurs indiquées des résistances et les pentes des deux lampes :* $S_1 = 1\ mA/V$ *et* $S_2 = 10\ mA/V$; *on suppose que les capacités constituent de vrais courts-circuits en alternatif;*

b) *Par suite de variations des tensions d'alimentation, les pentes de*

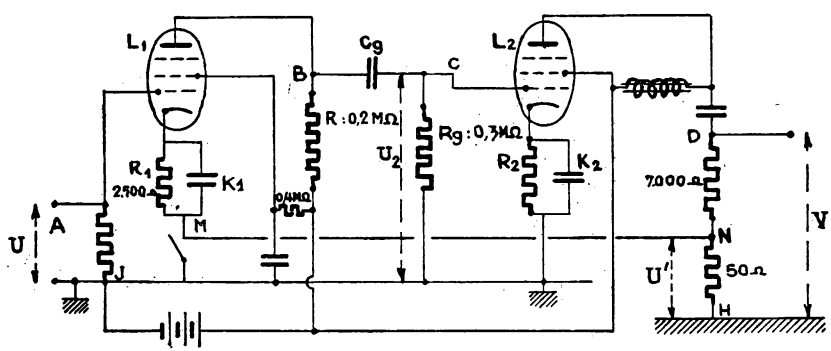


FIG. 4.

L_1 et L_2 varient respectivement entre 0,8 *et* 1,2, *d'une part, entre* 8 *et* 12 *mA/V, d'autre part; entre quelles limites varie l'amplification; expression de la variation en % de la valeur moyenne.*

2° *Interrupteur M ouvert.*

a) *Montrer que tout se passe comme si l'on superposait, sur la grille de la première lampe, à la tension U une tension U′ en opposition de phase.*

b) *Calculer l'amplification et U′.*

c) *Entre quelles limites varie l'amplification dans les conditions prévues au 1° b.*

3° *Comparer les résultats des 1° b et 2° c.*

Marseille, 1952.

SOLUTION :

1° *a*) Courant plaque de $L_1 = S_1 U$;

Résistance équivalente à R et $R_g = 0{,}12\ M\Omega$;
Tension à la grille de $L_2 = S_1 U \times 120\,000 = U_2$;
Courant plaque de $L_2 = S_2 U_2$;
Tension de sortie (on peut négliger $50\ \Omega$) $= 7\,000\ S_2 U_2$;

D'où : $A_0 = 120 \times 70$.

b) L'amplification est minima pour les pentes 0,8 et 8 mA/V et maxima pour les pentes de 1,2 et 12 mA/V.

Amplification minima : $120 \times 0{,}8 \times 70 \times 8 = A_1 = 0.64\ A_0$;
maxima : $120 \times 1{,}2 \times 70 \times 12 = A_2 = 1{,}44\ A_0$.
Ecart maximum de l'amplification $= A_0\ (1{,}44 - 0{,}64) = 0{,}8\ A_0$.
Proportion de la valeur moyenne : 80 %.

2° *a*) Un accroissement du potentiel de A donne une diminution du potentiel de B et C; d'où un accroissement du potentiel de D et N, soit une diminution de la tension du point H (ou J) par rapport à la cathode de L_1, en opposition de phase avec la tension U entre J et A.

b) Tension grille entrée : $(U - U')$;
Courant plaque deuxième lampe :

$$S_1 (U - U') \times 120\,000 \times S_2;$$

tension U′ aux bornes des 50 ohms :

$$S_1 (U - U') \times 120\,000 \times S_2 \times 50 = U' \qquad [1]$$

soit : $U' = \frac{60}{61} U$ et la tension grille d'entrée : $\frac{U}{61}$; l'influence de U′ réduit la tension de grille résultante et l'amplification à : $A'_0 = \frac{A_0}{61} = 0{,}016\,4\ A_0 = 137$.

c) Un calcul analogue à celui de [1] avec $S_1 = 0{,}8$ et $S_2 = 8$ mA/V donne une valeur de $U' = \frac{38{,}4}{39{,}4} U$ et $(U - U') = \frac{U}{39{,}4}$; d'où l'amplification :

$$\frac{A_1}{39{,}4} = 0{,}016\,2\,A_0 = 136.$$

De même, avec les pentes maxima, l'amplification :

$$\frac{A_2}{87{,}4} = 0{,}016\,5\,A_0 = 138.$$

3°. La contre-réaction diminue l'amplification qui, par contre, demeure pratiquement insensible aux variations des tensions d'alimentation.

QUESTION DE COURS. — *Le tube cathodique; constitution; rôle des diverses électrodes; concentration du spot; déviation électrique et magnétique; applications.*

7. PROBLÈME. ***Amplificateur à B.F.*** (XI) (fig. 5). — *On demande :*

1° *Le rôle de la triode;*

2° *La valeur des tensions sur les grilles des tétrodes lorsque* $U = 1{,}03$ *V;*

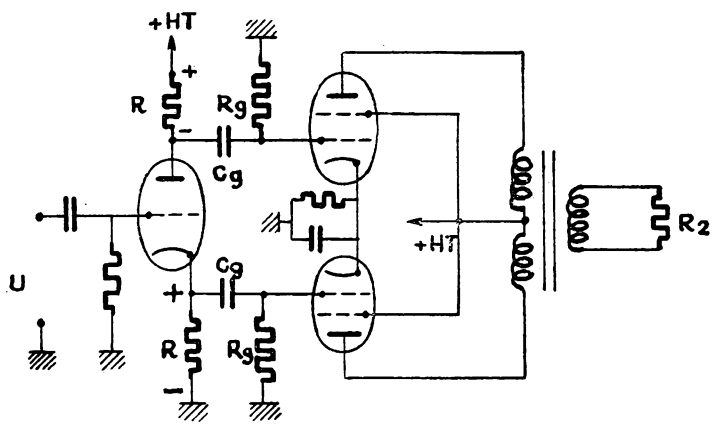


FIG. 5.

3° *Le rapport* $\frac{n_2}{n_1}$ *du transformateur de sortie correspond à la charge optima des tétrodes et la puissance correspondante* P_2 *livrée à la résistance* R_2.

On donne :

— pouvoir amplificateur et résistance de la triode : $K = 60$ $r = 10\,000\ \Omega$;

— la pente $S = 10$ *mA/V et l'impédance de charge optima par tétrode* $= 4\,500\ \Omega$ *(lampes en classe A)*;

$— R = 10\,000\ \Omega$ *et* $R_2 = 10\ \Omega$.

Paris, 1955.

SOLUTION :

1° La variation i_p du courant de plaque donne aux bornes des deux résistances égales R des tensions égales transmises en opposition de phase à travers les blocs $C_g R_g$ aux grilles des deux tétrodes; la triode permet ainsi l'attaque en opposition de phase des deux tétrodes.

2° On a :

$$r i_p = v_p + K v_g;$$

avec :

$$v_p = -2\,R i_p; \qquad v_g = (U\sqrt{2}\cos\omega t - R i_p);$$

d'où :

$$I_p = \frac{KU}{r + (K+2)\,R} \text{ (valeur efficace de } i_p)$$

et la tension aux bornes des résistances R_g :

$$V = RI_p = U \times \frac{KR}{r + (K+2)\,R} = 0{,}91\ V.$$

3° On a :

$$n = \sqrt{\frac{10}{9\,000}} = \frac{1}{30}.$$

Courant dans le primaire du transformateur :

$$I_1 = \frac{10}{1\,000} \times 0{,}91 \text{ soit : } 9{,}1\ mA;$$

$$P_2 = 9\,000 \times \left(\frac{9{,}1}{1\,000}\right)^2 \text{ soit : } 0{,}75\ W.$$

Courant secondaire : $9{,}1 \times 30 = 273$ mA.

QUESTION DE COURS. — *Antenne unifilaire verticale : résonances et antirésonances; répartition du courant en intensité et en phase (nœuds, ventres); influence d'une self et d'une capacité à la base de l'antenne.*

8. PROBLÈME. ***Etage B.F. de sortie*** (XI). — *On donne l'équation de la triode d'un étage de sortie d'un récepteur* (fig. 6) :

$$10\,000\,I_p = V_p + 20\,V_g + 1\,000 \qquad (I_p \text{ en } A;\ \text{tensions en } V) \qquad [1]$$

Puissance livrée au haut-parleur : 8 W; résistance de charge de la plaque : $R_1 = 20\,000\ \Omega$. Résistance du haut-parleur : $R_2 = 8\ \Omega$; dissipation maxima de la lampe : 48 W. Fonctionnement en classe A.

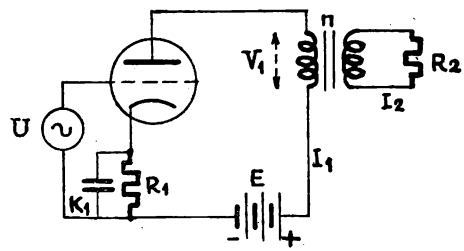


FIG. 6.

1° *Valeur du rapport de transformation n du transformateur de sortie;*

2° *Valeurs des courants B.F., I_1 et I_2 dans le primaire et le secondaire;*

3° *On désire avoir une tension de déchet de 30 %; valeur de la tension continue E de plaque. Dans la suite on adopte : $E = 800\ V$.*

4° *Tension d'excitation U de la grille;*

5° *On veut réduire la dissipation à la moitié du maximum du catalogue; valeur correspondante de R_1.*

Paris, 1955.

SOLUTION :

1° $n = \dfrac{2}{100}$.

2° $R_2 I_2^2 = 8\,I_2^2 = 8; \qquad I_2 = 1\ A; \qquad I_1 = 20\ mA.$

3° $V_1 = 20\,000 \times \dfrac{20}{1\,000} = 400\ V$; le minimum du potentiel de plaque est :

$$E - 400\sqrt{2} = 30\ \%\ E; \text{ d'où : } E = 806\ V.$$

4° La f.é.m. KU développée dans le circuit de plaque est la somme des tensions $V_1 = 400\ V$ et $200\ V$ aux bornes de la résistance intérieure r.

5° Au repos pour $U = 0$, la polarisation négative $-U_0$ de la grille aux bornes de R_1 doit donner un courant de plaque I_{p0} tel que :

$$EI_{p0} = 800\,I_{p0} = 24; \qquad I_{p0} = 30\ mA.$$

L'application de [1] donne :

$$10\,000 \times \frac{3}{100} = \left(800 - R_1 \frac{3}{100}\right) - 20\,R_1 \times \frac{3}{100} + 1\,000$$

et $R_1 = 2\,381\ \Omega$ donnant :

$$-U_0 = -71{,}43\ V.$$

QUESTION DE COURS. — *Sélectivité d'un récepteur à changement de fréquence; importance du choix de la M.F.; protection contre l'onde image.*

9. PROBLÈME. ***Poste émetteur*** (XII). — *Un émetteur de télégraphie comporte un étage pilote sur 3 125 kc/s, un étage multiplicateur et deux étages amplificateurs; antenne unifilaire verticale de longueur $l = 10$ m :*

1° *A quelle distance de la base est le ventre de courant lorsque le deuxième étage fonctionne en tripleur ou en doubleur;*

2° *Pour un fonctionnement en doubleur, l'antenne est équivalente à une capacité $C = 170\ pF$ en série avec une résistance $R = 120\ \Omega$; on a, en trait continu :*

— *source de tension plaque de l'étage final $E = 2\,000\ V$;*

— *courant continu plaque : $I_0 = 0{,}4\ A$;*

— *intensité à la base de l'antenne : $I_A = 2\ A$.*

On demande :

— *la puissance livrée par la source de plaque P_t;*

— *la puissance fournie à l'antenne P_u;*

— *le rendement η de l'étage final;*

— *la tension V à la sortie de l'émetteur.*

3° *En portant E à 3 000 V, on double la puissance livrée par l'émetteur et la puissance perdue dans le dernier étage est de 440 W. Valeurs des courants I_A et I_0.*

Marseille, 1954.

SOLUTION :

1° Etage tripleur : fréquence $3{,}125 \times 3 = 9{,}375$ Mc/s; $\lambda = 32$ m; le ventre de courant se trouve à $\frac{\lambda}{4} = 8$ m de l'extrémité, soit 2 m à partir de l'émetteur.

Etage doubleur : $\lambda = 48$ m. Le ventre virtuel est à 12 m de l'extrémité; le courant croît toujours de l'extrémité du fil à la base.

2° $P_t = 800\ W$; $P_u = 480\ W$; $\eta = 60\ \%$;

$$V = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}} \times I_A; \qquad \frac{1}{C\omega} = 150\ \Omega.$$

3° On a : puissance utile $= (3\,000\, I'_0 - 440) = 2 \times 480$

$$RI'^2_A = 2 \times 480$$

(I'_0 et I'_A = nouvelles valeurs des courants continu de plaque et d'antenne).

QUESTION DE COURS. — *Propagation d'un courant le long d'une ligne unifilaire horizontale indéfinie; vitesse de propagation; longueur d'onde; résistance caractéristique; affaiblissement; définition du décibel; impédance terminale pour un régime d'ondes progressives.*

10. PROBLÈME. ***Entrée d'un récepteur; bruit de fond*** (CM n° 11-IX) (fig. 7). — *L'énergie recueillie par l'antenne induit dans L une f.é.m. E.*

1° *Valeur d'accord de C pour $L = 1\ \mu H$ et une fréquence $N_0 = 25\ Mc/s$;*

2° *Valeur de la tension de grille : $R = 1\ \Omega$ et $E = 10\ \mu V$;*

3° *Valeur en db du rapport signal/bruit sur la grille.*

On donne la f.é.m. de bruit induite dans L :

$$V = 4\sqrt{R_b \times \Delta N}\ \mu V;$$

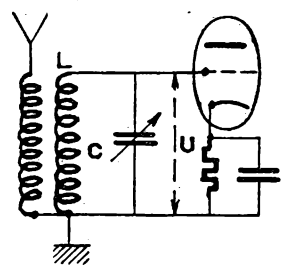


FIG. 7.

où : R_b = résistance équivalente au circuit bouchon de grille en MΩ;

$\Delta N = \dfrac{2N_0}{Q}$ *= largeur de bande à 6 db du circuit accordé de surtension Q. On donne : log 2 = 0,3.*

4° *Que se passe-t-il lorsque R devient double ? Valeur optima de R donnant le meilleur rapport signal à bruit.*

Paris, 1954.

SOLUTION :

1° $C = 40\ pF$.

2° $L\omega = 157\ \Omega$; $Q = \dfrac{L\omega}{R} = 157$; $U = QE = 1\,570\ \mu V$.

3° $\Delta N = 318$ Kc/s.

$R_b = QL\omega = 24\,650\ \Omega$ et $V = 11{,}2\ \mu V$.

$\dfrac{\text{Signal}}{\text{bruit}} = \dfrac{1\,570}{11{,}2} = 140$ correspondant à $20 \log 40 = 43$ db.

4° Q, U et R_b diminuent de moitié, tandis que ΔN devient double; V reste constant et le rapport signal/bruit décroît de la moitié; d'où l'intérêt à choisir un circuit d'entrée à forte surtension.

QUESTION DE COURS. — *Régime libre de deux circuits couplés de même période propre dont le primaire est le siège d'une f.é.m. sinusoïdale. Variations des courants primaire et secondaire et du rendement de puissance secondaire en fonction du couplage; couplage critique. Forme de la courbe de résonance secondaire suivant la valeur du couplage.*

11. PROBLÈME. ***Récepteur à contrôle automatique du gain*** (C.A.G.) (voir CM, N° 15-XIX). — *Le récepteur de la figure* (8 *a*) *comporte un dispositif à C.A.G. du type retardé.*

1° *On demande les rôles de* R_2, R_1, C_1 *et de la tension continue E (réponse en huit lignes au maximum);*

2° *On donne :* $E = 10\,V$; *gain de tension des transformateurs* $T_1 = 10$; $T_2 = T_3 = 1$; *résistances équivalentes de* T_2 *et* T_3 *sur les circuits de plaque* $= 50\,000\,\Omega$; *pente des pentodes :*

$$S = 4\left(1 - \frac{V_0}{20}\right) m\ A/V, \qquad [1]$$

où V_0 *en volts = valeur absolue de la tension de polarisation des grilles fournie par la ligne du C.A.G. et compte tenu des résistances de polarisation automatique R; le fonctionnement du C.A.G. n'introduit aucun amortissement appréciable sur le secondaire de* T_3 *et la tension continue redressée est voisine de la valeur de crête de la H.F.*

Calculer :

a) *Les valeurs de la tension de sortie V (entre le point S et la masse) et de la tension continue entre le point P et la masse pour une tension d'entrée U égale à* $5\,\mu V$ *ou à* $200\,\mu V$;

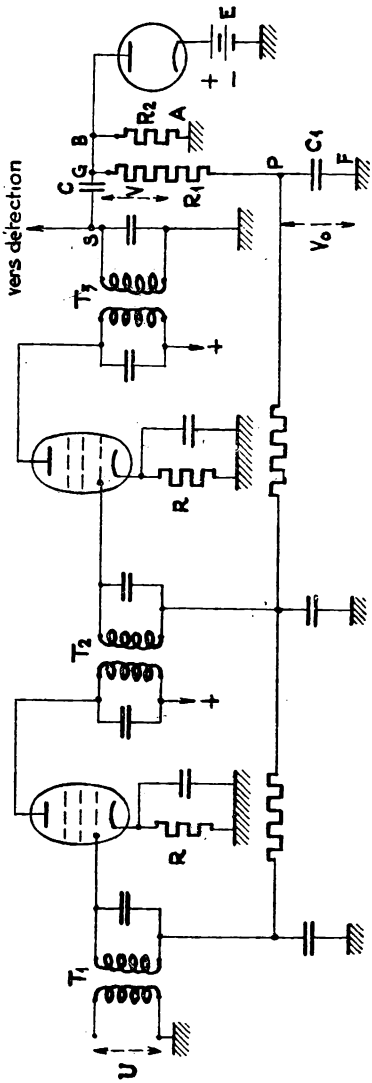
b) *Pour les valeurs de V égales à* 1; 5; 10; 15; 20 *et* $25\,V$, *les valeurs de* V_0, *de la pente S, de l'amplification* $A = \frac{U}{V}$, *de U et du gain* g *en décibels.*

N.B. — 1° *Les valeurs V et U sont des amplitudes;* 2° *on donne :* $\log 1{,}5 = 0{,}175$; $\log 2 = 0{,}3$; $\log 2{,}25 = 0{,}35$; $\log 2{,}5 = 0{,}4$.

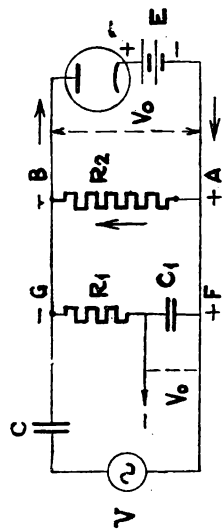
Paris, 1953.

SOLUTION :

1° La tension de sortie V (fig.8 *b*) est transmise à travers C à la plaque de la diode; le courant continu redressé se ferme suivant les flèches (fig. 8 *b*),


E
+ -
B
R_2
A
C
G
V
R_1
P
C_1
F
vers déflection
S
V_0
T_3
+
R
T_2
+
R
T_1
U

(a)


E
+ -
V_0
B
R_2
A
G
R_1
C_1
F
C
V_0
V

(b)

FIG. 8.

donnant aux bornes de R_2 la tension continue V_0 entre A et B que l'on retrouve entre F et G aux bornes de C_1 en l'absence de tension *continue* aux bornes de R_1 qui ne peut être le siège d'un courant continu; la tension de plaque de la diode est la superposition de la tension continue négative $-(E + V_0)$ et de la tension sinusoïdale d'amplitude V; on a : $V = E + V_0$.

2° *a*) Lorsque $V < E$, soit $V < 10$ V, il n'y a point redressement, $V_0 = 0$, la pente S (4 *m* A/V) et l'amplification sont constantes; le C.A.G. fonctionne lorsque V dépasse 10 V; la valeur correspondante de la tension d'entrée U est telle que l'on ait :

$$U \times 10 \times 50\,000^2 \times \left(\frac{4}{1\,000}\right)^2 = 10,$$

soit : $U_m = 25$ μV avec une amplification : $A_M = 400 \times 10^3$.

Pour : $U = 5$ μV, on a : $V = A_M \times 5 \times 10^{-6} = 2$ V.

Pour : $U = 200$ μV, le C.A.G. fonctionne et donne une tension V_0 et une pente telles que :

$$V = 200 \times 10^{-6} \times 10 \times 50\,000^2 \times S^2 = E + V_0 = 10 + V_0.$$

D'où la valeur de V_0 portée dans [1]; ce qui conduit à l'équation du deuxième degré :

$$250^2 \times 4\,S^2 + 250\,S - 1{,}5 = 0,$$

dont la seule solution positive est : $S = 2$ *m* A/V.

b) On a le tableau suivant :

V	1	5	10	15	20	25	V
V_0	0	0	0	+ 5	+ 10	+ 15	V
S	4	4	4	3	2	1	*m* A/V
A	400	400	400	225	100	25	$\times 10^3$
U			25	70	200	10^3	μV
g	112	112	112	107	100	88	db

On a : $g = 20 \log (10 \times 25 \times 10^2 S^2) = 20\,(4{,}4 + 2 \log S)$.

Ex. $V = 15$ V; $S = 3 = 1{,}5 \times 2$ et $\log S = \log 1{,}5 + \log 2 = 0{,}475$.

Pour les valeurs de U inféricures à 25 μV, l'amplification est uniforme; lorsque U croît de 25 à 1 000 μV (multiplication par 40), V croît de 10 à 25 V (multiplication par 2,5) : le C.A.G. tend à uniformiser la tension de sortie lors des variations de U supérieures à 25 μV.

QUESTION DE COURS. — *Propagation d'un courant le long d'une ligne bifilaire indéfinie; vitesse de propagation; longueur d'onde; résistance caractéristique. Adaptation terminale.*

12. PROBLÈME. ***Base de temps d'un oscilloscope*** (CM. N° 19-XII). — *On utilise un thyratron T (fig. 9) avec : $R = 5\ M\Omega$; $C = 12\ m\mu F$; $E = 500\ V$; tension d'amorçage du thyratron = 50 V ou 30 V pour les deux polarisations de grille $-U_0$ égales à $-3\ V$ et $-2\ V$; tension de désamorçage plaque cathode = 10 V.*

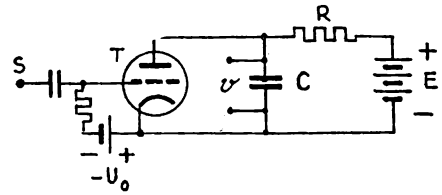


FIG. 9.

1° *Fonctionnement du système pour $-U_0 = -3\ V$; fréquence F des oscillations et amplitude maxima ΔV de la tension en dents de scie; tracer plusieurs périodes de la courbe $v = f(t)$; on néglige la durée de décharge du condensateur et l'on admet la loi :*

$$v = \frac{E}{RC}\ t \qquad (R \text{ en } \Omega \text{ et } C \text{ en } F).$$

2° *Le système étant en état d'oscillations, on applique en S à travers C des impulsions positives brèves de 1 V, se succédant à la fréquence f légèrement supérieure à F. Que se passe-t-il ? Décrire le phénomène : calculer la fréquence F' et l'amplitude $\Delta V'$ des oscillations de balayage pour $f = \frac{4}{3}F$; limites inférieure et supérieure de f assurant une synchronisation du type décrit ci-dessus.*

3° *Décrire le phénomène observé sur l'écran d'un oscilloscope lorsque f croît de 250 à 2 000 cs pour un signal sinusoïdal de fréquence $N = 250$ cs, en indiquant :*

— Pour quelles valeurs de f l'image est stable; — Les variations du nombre des alternances visibles sur l'écran quand l'image est stable.

Paris, 1952.

SOLUTION :

1° On a : $CR = 6 \times 10^{-2}\ s$; $t_1 =$ temps pour que v, partant de O, atteigne 50 V; $v = 50 = \frac{500}{6 \times 10^{-2}}\ t_1$ soit : $t_1 = 6 \times 10^{-3}$; la période $T = \frac{1}{F}$ est le temps $(t_1 - t_0)$ (fig. 10) correspondant à un accroissement de v entre 10 V et 50 V, soit : $T = \frac{4}{5} t_1 = 48 \times 10^{-4}\ s$; d'où F = 208,3 cs.

2° Chaque impulsion fait passer la polarisation de la grille de $-U_0 = -3$ V à $(-U_0 + 1) = -2$ V et il y a amorçage si, à l'instant d'arrivée d'une impulsion, v est supérieur à 30 V; lorsque $f = \frac{4}{3}$ F $= F' = 277{,}7$ cs, les impulsions se suivent à intervalles $T' = \frac{3}{4}$ T correspondant à une variation de v entre 10 V et $(10\text{ V} + \frac{3}{4}40) = 40$ V; il y a donc amorçage à chaque impulsion et réalisation d'une tension de

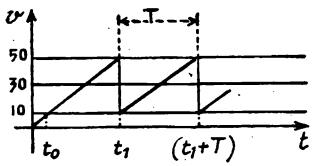


Fig. 10.

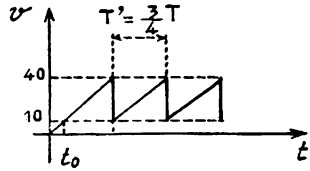


Fig. 11.

balayage à la fréquence *régulière* des impulsions. Les impulsions jouent leur fonction de synchronisation lorsqu'elles se suivent à des intervalles inférieurs à T et suffisamment éloignés $\left(\text{supérieurs à } \frac{T}{2}\right)$ pour que v ait le temps d'atteindre 30 V ($f = 2\text{ F} = 416{,}6$ cs).

3° L'image est stable lorsque la période de balayage $\frac{1}{f}$ est un nombre entier de demi-périodes $\frac{1}{2N}$: $f = \frac{2N}{k}$ (k = nombre entier);

$$= \frac{500}{k};$$

les valeurs paires de k (2, 4, 6, ...) donnent sur l'écran un nombre entier de périodes; pour les valeurs impaires (1, 3, 5, ...) on aperçoit un nombre égal de demi-alternances et leur représentation symétrique (ex. fig. 12 pour $k = 3$).

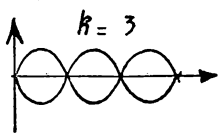


Fig. 12.

Question de cours. — *Circuit bouchon : antirésonance; condition d'antirésonance; résistance équivalente à l'antirésonance; courbe d'antirésonance.*

13. Problème. ***Modulation de fréquence ou de phase*** (CM n° 3-XV). — *La tension de modulation décroît linéairement en amplitude de V à* $\frac{V}{8}$ *quand la fréquence croît de* 300 *à* 2 400 *cs.*

1° *Cette tension sert à la modulation d'un modulateur de phase; déterminer les variations, en fonction de la fréquence F de modulation, de l'indice de modulation* $\frac{\Delta f}{F}$ *et de la déviation* Δf *de l'onde émise.*

2° *Mêmes questions, la tension de modulation étant appliquée au modulateur de phase par l'intermédiaire du montage de la figure* 13 *où la résistance R est très supérieure à* $L\Omega$ ($\Omega = 2\pi F$).

3° *Le signal émis dans les conditions du* 2° *étant reçu sur un récepteur à modulation de fréquence, étudier les variations en fonction de F du rapport entre l'amplitude du signal à la sortie du discriminateur et l'amplitude du signal BF d'origine.*

4° *Pour une déviation* $\Delta F = 1$ *Kc/s à* 1 000 *cs à l'émission, le signal reçu au* 3° *est à* 20 *db au-dessus du bruit de fond; quel doit être l'indice pour que le rapport signal/bruit soit de* 30 *db ?*

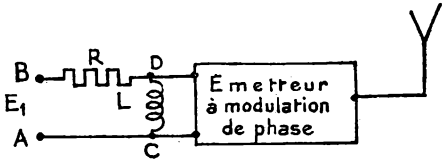


FIG. 13.

5° *L'indice ayant la valeur du* 4°, *calculer, en degrés, la déviation de phase* $\Delta\varphi_0$ *de l'onde modulée.*

On a : $\log \pi = 0{,}5$.

Alger, 1952.

SOLUTION :

1° Le modulateur de phase donne une déviation Δf proportionnelle à la fréquence F et à l'amplitude du signal; comme celle-ci décroît avec la fréquence, la déviation Δf se maintient constante, tandis que l'indice décroît avec F.

2° La tension entre A et B E_1 de pulsation Ω donne un courant :

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1} \text{ (on néglige } L\Omega << R_1)$$

et une tension de sortie entre C et D :

$$E_2 = L\Omega I_1 = E_1 \frac{L\Omega}{R}$$

E_1 et $L\Omega$ varient en sens inverse lorsque Ω croît et E_2 est constant; le modulateur de phase alimenté sous tension constante donne une déviation Δf proportionnelle à F et l'indice $\frac{\Delta f}{F}$ est constant.

3° Le discriminateur à la réception donne un signal d'amplitude proportionnelle à Δf, soit à F : le signal d'origine étant proportionnel à $\frac{1}{F}$, le rapport demandé est proportionnel à F^2.

4° F étant constant, le signal reçu est proportionnel à Δf; la nouvelle déviation $\Delta' f$ donne un gain de 10 db tel que : $20 \log \frac{\Delta' f}{\Delta f} = 10$,

soit :

$$\frac{\Delta' f}{\Delta f} = \pi \qquad \text{ou : } \Delta' f = 3\,141 \text{ cs.}$$

5° $\Delta\varphi_{0'} = m = 3\,141$ soit π radians ou 180°.

QUESTION DE COURS. — *Tétrodes et pentodes; rôle des différentes grilles (on se limitera au fonctionnement du tube lui-même).*

14. PROBLÈME. ***Klystron*** *(fig. 14)* (CM n° 6-XVII). — *Tension d'alimentation : $E = 2\,500$ V.*

La vitesse v des électrons est liée au potentiel par rapport à la cathode par la relation :

$$v = 6 \times 10^5 \sqrt{V}; \qquad v \text{ en m/s et } V \text{ en V.}$$

et l'on néglige l'influence des charges spaciales sur le mouvement.

1° *Valeur φ du rapport de la vitesse de propagation des ondes en espace libre et la vitesse v_0 à la traversée de la grille g_1, en l'absence de tension alternative.*

2° *Valeur de la distance maxima d entre g_1 et g'_1 ou entre g_2 et g'_2*

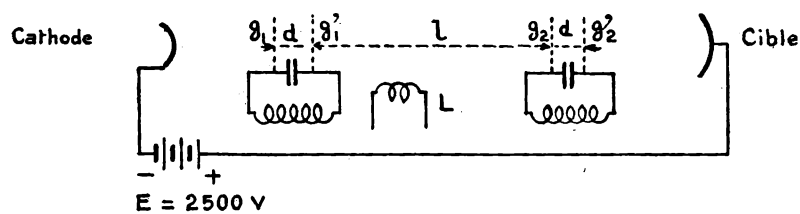


FIG. 14.

pour que le temps de transit des électrons entre g_1 et g'_1 ou g_2 et g'_2 soit inférieur au quart de la période des oscillations pour $\lambda = 10$ cm.

3° *Au moyen de la ligne L couplée à la cavité résonnante d'entrée C (schématisée à la figure par un circuit classique), on applique entre g_1 et*

g'_1 une tension u de fréquence correspondant à $\lambda = 10$ cm; d est suffisamment faible pour que u soit pratiquement constant durant la traversée de l'espace $g_1 g'_1$; suivant le signe de u, les électrons reçoivent au passage une accélération supplémentaire ou un freinage; un électron sort de g'_1 avec une vitesse $(E + V_m \sin \omega t)$ (où V_m et ω sont l'amplitude et la pulsation de u) qui se conserve au-delà dans l'espace de glissement; on donne $V_m = 200$ V et l'on demande la longueur l de l'espace de glissement entre g'_1 et g_2 pour qu'un électron passant en g'_1 à l'instant où le champ est le plus retardateur ($\sin \omega t = -1$) soit rattrapé exactement en g_2 par l'électron passant ultérieurement en g'_1 au moment où le champ est devenu pour la première fois le plus accélérateur.

Paris, 1952.

SOLUTION :

1° $v = 3 \times 10^9$ cm/s, soit : $\rho = 10$.

2° $\dfrac{T}{4} = \dfrac{1}{12 \times 10^9}$ s; d'où : $d = \dfrac{1}{12 \times 10^9} \times 3 \times 10^9 = \dfrac{1}{4}$ cm.

3° La vitesse des électrons à la sortie de g'_1 pour un minimum de u correspond à un potentiel de 2 300 V, soit : $2{,}8775 \times 10^9$ cms; les électrons transmis avec un maximum d'accélération quittent la grille g'_1 avec une retard $\dfrac{T}{2}$ et une vitesse correspondant à 2 700 V, égale à $3{,}1177 \times 10^9$ cms; ils rattrapent les premiers au bout d'un temps t (compté à partir du départ de g'_1 des électrons rapides) tel que l'on ait :

$$x_1 = 2{,}8775 \times 10^9 \left(t + \frac{T}{2}\right) = 3{,}1177 \times 10^9 \ t$$

soit : $t = \dfrac{2}{10^9}$ sec et : $l = x_1 = 3{,}1177 \times 10^9 \times \dfrac{2}{10^9} = 6{,}22$ cm = espace de glissement.

QUESTION DE COURS. — *Amplification H.F. de tension dans un récepteur; schéma des montages à couplage à résonance à simple et double circuit; montages symétriques; lampes utilisées; ordre de grandeur des gains obtenus.*

15. PROBLÈME. ***Radar*** (CM n° 27-XX). — *L'émetteur peut être considéré comme un générateur H.F. de 6.000 V de f.é.m. efficace en crête et de résistance interne égale à 90 Ω; il débite sur l'antenne de résistance apparente de rayonnement égale à 90 Ω :*

1° *Valeur de la puissance de crête rayonnée;*

2° *Valeur en db du rapport entre la puissance émise et la puissance reçue, sachant que la résistance d'entrée du récepteur est de* 90 Ω *et que la tension aux bornes de cette résistance est de* 30 μV *en crête;*

3° *Limites extrêmes de la fréquence de récurrence pour un obstacle à* 60 *km; on exige que le retour de l'écho se produise dans la première moitié de l'intervalle de temps séparant deux impulsions et que, pour la vitesse maximum de rotation de* 5 *tours/minute, l'angle de rotation de l'antenne entre deux impulsions successives ne dépasse pas* $\frac{1}{4}$ *de degré.*

Alger, 1954

SOLUTION :

1° Courant crête $I = \frac{6\,000}{2 \times 90} = 33$ A.

Puissance crête : $P_e = 90 \times 33^2 = 90$ kW.

2° Puissance reçue : $P_r = \frac{(30 \times 10^{-6})^2}{90} = 10^{-11}$ W;

$$\frac{P_e}{P_r} = 9 \times 10^{15};$$

$10 \log \frac{P_e}{P_r} = 10\,(15 + \log 9)$, soit : 160 db.

3° Durée parcours aller et retour (120 km) $= \frac{12}{30}$ ms, correspondant à une période de récurrence double $T = \frac{24}{30}$ ms et à une fréquence de récurrence 1 250.

Dans le temps T, l'antenne a tourné d'un angle :

$$\frac{5 \times 360^\circ}{60} \times T << \frac{1}{4} \text{ de degré.}$$

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION. — Rappels de notions élémentaires de mathématiques..... 7

CHAPITRE PREMIER. — Rappels d'électricité..... 16

CHAPITRE II. — Courants sinusoïdaux. Courants modulés téléphoniquement.... 26

CHAPITRE III. — Régime libre d'un circuit simple..... 38

CHAPITRE IV. — Résonance et antirésonance d'un circuit simple..... 47

CHAPITRE V. — Circuits couplés..... 64

CHAPITRE VI. — Propagation des courants sur les fils. Ondes progressives. Ondes stationnaires..... 74

CHAPITRE VII. — Rayonnement d'une antenne..... 83

CHAPITRE VIII. — Mécanisme d'un aérien de réception..... 88

CHAPITRE IX. — Caractéristiques générales des lampes à plusieurs électrodes.. 97

CHAPITRE X. — Amplification à haute fréquence dans les récepteurs..... 106

CHAPITRE XI. — Amplification à basse fréquence dans les récepteurs. Lampe génératrice d'oscillations. Détection. Changement de fréquence..... 127

CHAPITRE XII. — Le poste émetteur à lampes..... 153

Tables numériques d'appréciation d'une quantité en décibels..... 164

APPENDICE. — Problèmes posés aux récents examens d'Opérateurs radio de la Marine marchande 165

EPREUVES de 1950 à 1955..... 182

IMPRIMERIE « L'UNION TYPOGRAPHIQUE »
VILLENEUVE-SAINT-GEORGES (S.-ET-O.)

Dépôt légal : 3e trimestre 1950
N° d'éditeur : 1170 N° impr. : 276-58

ÉDITIONS EYROLLES

BASSERAS. — **Exercices et Problèmes de Radioélectricité à l'usage des Ingénieurs,** 272 pages (1957).

BRÉANT. — **Cours de Mesures électriques,** Tome I, 366 pages (1956). Tome II, 356 pages (1957).

FAUGERAS. — **Appareils et Installations télégraphiques,** 244 pages (1955).

FONTAINE. — **Éléments d'Essais de Machines électriques,** 80 pages (1948).

— **Éléments de Mesures électriques,** 80 pages (1948).

LA TOISON. — **Ultra-violet, Visible, Infra-Rouge,** 166 pages (1955).

PLACE. — **Cours sur les Ondes Ultra-Courtes,** 186 pages (1953).

PRACHE-JANNÈS-TROUBLÉ-CLAVAUD. — **Cours de Lignes à grandes distances,** 442 pages (1954).

SOLOMANIUCK. — **Rebobinage des moteurs asynchrones,** 176 pages (1957).

SUCHET et JANNÈS. — **Problèmes d'Électricité avec solutions,** 182 pages (1958).

TUCOULAT. — **Memento du Constructeur de Lignes aériennes de Télécommunications,** 256 pages (1958).

VEAUX. — **Le Récepteur de Télévision,** 342 pages (1954).

— **Cours élémentaire de Radioélectricité générale,** 156 pages (1957).

— **Cours moyen de Radioélectricité générale,** 364 pages (1957).

— **Recueil de problèmes de T.S.F. avec solutions,** 204 pages (1957).

ÉDITIONS EYROLLES